



***Facultad
de
Ciencias***

**PROCESADO DE IMÁGENES PARA
DETECCIÓN DE EXOPLANETAS**
(Image processing for exoplanets detection)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autor: Carlos Iglesias Rumazo

Director: Manuel Pérez Cagigal

Junio - 2021

Índice general

1. Introducción	5
1.1. Aberración atmosférica	5
1.2. Lucky Imaging	6
1.2.1. Caracterización del halo	7
1.2.2. Ventajas	8
1.2.3. Desventajas	8
1.2.4. Desarrollo de algoritmos de mejora	9
1.3. Teoría de Speckle	10
2. Procedimiento	13
2.1. Métodos de corrección de ruido. Máscaras	13
2.2. Desviación estándar espacial	14
2.2.1. Promedio temporal de desviaciones espaciales	14
2.2.2. Stack de desviaciones estándar espaciales	15
2.3. Desviación estándar temporal	16
2.4. Combinación de máscaras	16
2.5. Procesamiento posterior	17
2.5.1. Procesado sin máscaras	17
3. Resultados y análisis	18
3.1. Calidad de las imágenes	18
3.2. Caracterización del halo	22
3.3. Estudio de la heterocedasticidad	25
3.4. Procesado básico: promedios	26
3.4.1. Centrado y promedio	29
3.5. Procesado de nivel I	30
3.5.1. Sustracción de desviación estándar espacial	30

3.5.2.	División por desviación estándar espacial	32
3.5.3.	Sustracción de desviación estándar temporal	33
3.5.4.	División de desviación estándar temporal	34
3.5.5.	Cocientes señal ruido	35
3.6.	Procesado de nivel II	36
3.6.1.	Producto espaciales	37
3.6.2.	Prodcuto temporales	37
3.6.3.	Producto sustracciones	38
3.6.4.	Producto divisiones	39
3.6.5.	Productos cruzados	40
3.6.6.	Cocientes señal ruido nivel II	41
4.	Conclusiones	45

En primer lugar, le agradezco a Manuel, mi director en este trabajo, su dedicación a guiarme durante toda la duración del mismo. Invirtiendo en el proceso su tiempo y esfuerzo siempre que lo necesitaba.

Por otra parte, no puedo olvidar a todos los compañeros que he ido conociendo durante el transcurso de estos últimos cuatro años que me han apoyado y ayudado desde el primero hasta el último.

Finalmente, como no podía faltar, agradezco el apoyo incondicional que mi familia me ha brindado durante toda mi trayectoria académica.

A mi padre

RESUMEN

La luz captada por telescopios terrestres proveniente de estrellas y planetas se ve normalmente afectada por fluctuaciones en el índice de refracción de ciertas capas de la atmósfera. Esta situación introduce aberraciones en el frente de onda lo cual reduce la calidad de las imágenes astronómicas y dificulta su análisis. El presente trabajo intenta mejorar los resultados de la técnica de *lucky imaging* de corrección de imágenes. Con este objetivo se han desarrollado varios algoritmos novedosos basados en dicho método para aumentar la capacidad de procesamiento del mismo, permitiendo de este modo detectar planetas poco brillantes, incluyendo aquellos situados en la zona de habitabilidad de su estrella. Los algoritmos desarrollados permiten obtener buenos resultados; ampliando la capacidad de procesamiento y corrección del método *lucky imaging* y, consecuentemente, incrementando la capacidad de detección de objetos muy poco brillantes.

Palabras clave: procesamiento de imágenes astronómicas, *lucky imaging*, speckle, exoplanetas.

ABSTRACT

The light captured by ground-based telescopes from stars and planets is generally affected by fluctuations in the refractive index of particular atmosphere's layers. This situation introduces aberrations in the wavefront reducing the quality of astronomical images making them more difficult to analyse. The present work tries to improve the results obtained with the *lucky imaging* technique for image correction. With this objective in mind, several novel algorithms have been developed based on this method to increase its processing capacity, thus allowing it to detect dimmer planets, including those located in their star's habitable zone. The algorithms developed allow to obtain good results: expanding the processing and correction capacity of the *lucky imaging* method and, consequently, increasing the detection capacity of very dim objects.

Keywords: astronomical images processing, *lucky imaging*, speckle, exoplanets.

Capítulo 1

Introducción

La mejora de la calidad de las imágenes obtenidas por telescopios terrestres ha sido un tema relevante en astronomía desde sus inicios. Existen dos parámetros que sirven para determinar la calidad de la imagen: la resolución y el contraste. La resolución mide el grado de detalle que presenta la imagen mientras que el contraste nos da la capacidad de la imagen para distinguir puntos que presentan brillos de valor similar. La resolución de las imágenes astronómicas obtenidas por telescopios está limitada por las fluctuaciones del índice de refracción de la atmósfera que la luz atraviesa en su camino hacia la superficie terrestre. Diferentes técnicas como la interferometría de speckle o la óptica adaptativa han permitido recuperar una resolución cercana a la del límite de difracción del telescopio. Además, existe otra técnica llamada *lucky imaging* que permite seleccionar las imágenes que han sido menos afectadas por la atmósfera. Sobre este conjunto de imágenes se puede aplicar un procesamiento posterior que mejore significativamente tanto la resolución como el contraste final.

1.1. Aberración atmosférica

Una fuente puntual, como puede ser una estrella lejana, emite un frente de onda esférico (lugar geométrico de los puntos con la misma fase). Tras propagarse una larga distancia se convierte en un frente de onda plano y su imagen a través de un telescopio presenta una intensidad que viene dada por el patrón de Airy [1]. Sin embargo, cuando un frente de onda presenta una estructura irregular la imagen que proporciona el telescopio es un patrón de Airy rodeado por un halo de luz. El tamaño del halo viene determinado por el parámetro de Fried, r_0 , el cual depende de la longitud de

onda y se define como el diámetro de un área circular en la que la *rms* de la aberración del frente de onda debida a la turbulencia atmosférica es menor o igual a 1 radián.

Cuando la diferencia de fase entre el punto más alto y el punto más bajo dentro de la pupila del telescopio es del orden de un radián o menor lo que se tiene es la función de Airy (pudiendo estar sutilmente deformada pero esencialmente se encuentra dicho patrón enteramente). Cuando existe una fuente de aberraciones en el sistema óptico, como es la atmósfera, la calidad de la imagen obtenida depende de la magnitud de la aberración. Si la aberración es muy pequeña se tiene un pico central muy grande comparado con el halo. Si, por el contrario, se tiene una aberración muy grande el pico y el halo son casi todos iguales en altura.

1.2. Lucky Imaging

El método *Lucky Imaging* consiste en tomar un conjunto de imágenes con un corto tiempo de exposición (menor a 100ms típicamente), congelando así los efectos aberrantes de la atmósfera. Se seleccionan entre el conjunto de imágenes aquellas en las que se ha obtenido un pico más alto, es decir, las menos afectadas por la aberración atmosférica. Posteriormente las imágenes se centran, es decir, se hace coincidir el máximo de todas las imágenes en una misma posición y, por último, se promedia este conjunto de imágenes [2].

Según el criterio de Rayleigh, solamente se pueden distinguir dos máximos cuando estos se cortan a media altura. Si se cortan más cerca no se puede determinar si existen dos picos. Entonces, cuanto más anchos son los picos menor es la resolución. Cuando se promedia directamente este conjunto de imágenes de corta exposición, el resultado que se obtiene es una mancha de luz que se extiende por una superficie muy extensa. En este caso, se encuentra una resolución muy baja (ya que esta viene determinada por la anchura de la mancha de luz). Este es el caso general para telescopios de gran diámetro posicionados sobre la superficie de la Tierra.

El pico central es lo que se denomina pico de luz coherente y se denomina halo a la distribución de luz incoherente. El halo en cada imagen aparece como una realización de Speckle y, una vez promediado sobre el conjunto de imágenes, tiene una distribución continua y aproximadamente Gaussiana.

1.2.1. Caracterización del halo

Noll [3] estableció que la varianza introducida por las fluctuaciones aleatorias de la atmósfera se podía describir como:

$$\sigma^2 = 1,03 \left(\frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \quad (1.1)$$

Ahora, considerando el valor medio de la fase del frente de onda como 0, se calcula cual es la varianza de la fase dentro del telescopio. La energía concentrada en el pico de luz coherente se puede expresar aproximadamente como [4]:

$$i_{cp} = e^{-\sigma^2} \quad (1.2)$$

Este término exponencial es, aproximadamente, la intensidad del pico máximo de luz coherente normalizada a la intensidad de luz total distribuida en toda la imagen. Se observa que cuando la varianza es nula la energía distribuida en el pico es la unidad, es decir, toda la energía del frente de onda contribuye a formar el pico. Conforme la contribución de la aberración atmosférica aumenta el frente de onda se vuelve más irregular y, consecuentemente, la varianza aumenta. Esto implica que la energía del pico disminuye. Dado que la energía coherente es la que va a formar el pico, el resto de energía distribuida por el halo (energía incoherente) se puede expresar como:

$$i = 1 - e^{-\sigma^2} \quad (1.3)$$

La altura del halo resulta entonces de dividir la energía normalizada que lo forma por la superficie del propio halo:

$$i_h \approx \frac{1 - e^{-\sigma^2}}{\pi r_h^2} \quad (1.4)$$

Donde el radio del halo viene dado por:

$$r_h = 1,22\lambda_f/r_0 \quad (1.5)$$

Se observa entonces que cuanto más plano es el frente de onda más alto es el pico y más bajo es el halo, lo que se plantea en este trabajo es, precisamente, disminuir la contribución del halo a la imagen aprovechando la naturaleza de speckle del halo como se detallará más adelante en la *sección 1.2.4*.

Se observa también que a medida que r_0 decrece la varianza crece (1.1) y, consecuentemente, la altura del pico disminuye (1.2). De esta forma, a medida que se tienen valores de r_0 más bajos y/o telescopios más grandes (D) la varianza es mayor y se tiene más energía en el halo siendo este más extenso.

Por lo tanto, se intenta conseguir disminuir la anchura entre picos para poder resolver distancias más pequeñas.

1.2.2. Ventajas

La técnica de *Lucky Imaging* tiene varias ventajas. Esta técnica permite obtener imágenes de calidad de forma muy sencilla sin necesidad de recurrir a sistemas ópticos complejos para corregir la aberración del frente de onda. Esta sencillez de la técnica conlleva una alta rapidez en su aplicación así como una reducción de los errores introducidos por los numerosos componentes de un sistema óptico más complejo como el que se puede encontrar en la óptica adaptativa. Además, no es necesaria una estrella muy brillante para que este método aporte buenas correcciones evitando así la necesidad de sistemas auxiliares como, por ejemplo, el guiado láser para buscar objetos.

Por otra parte, incluso siendo una técnica extremadamente sencilla, en la banda del visible obtiene mejores resultados que la óptica adaptativa pudiendo llegar a obtener, con un procesamiento muy simple, valores de Strehl mucho más altos que esta última técnica.

1.2.3. Desventajas

Sin embargo, uno de los principales problemas de la técnica de *Lucky Imaging* reside en que para que esta técnica funcione se tiene que cumplir que la altura del pico sea el doble de la del halo. Esta condición lleva a que el cociente D/r_0 , donde D es el tamaño de la pupila del telescopio, debe tener un valor cercano a 8 [5]. Si el tamaño de la pupila del telescopio es mayor entonces el pico de luz coherente es más

bajo en relación con el halo y la fiabilidad del algoritmo se ve reducida drásticamente (pues comienza a ser poco distinguible la diferencia entre el pico y el halo). Todo lo anterior exige telescopios pequeños con un diámetro menor a 2.5m, dado que de no cumplirse esta condición cualquier pico se podría considerar como el máximo central. Hasta ahora, sólo existen tres telescopios que trabajan con *lucky imaging* y en los tres se encuentra el mismo comportamiento experimental, el cual se analizará y discutirá más adelante (*sección 3.1*).

1.2.4. Desarrollo de algoritmos de mejora

En la técnica de *Lucky Imaging*, como se ha expuesto anteriormente, se toma un gran volumen de imágenes del sistema que se desea estudiar y se seleccionan las mejores. Se reorganizan según su relación de Strehl, el valor del cociente entre la intensidad máxima observada en la imagen detectada y la intensidad teórica máxima del pico correspondiente al límite de difracción del telescopio.

Una vez realizada la adquisición, organización y selección de las mejores imágenes se analiza como varía la altura del pico central en función del número de imagen. Se observa que, para cualquier sistema del que se tienen resultados experimentales, la altura va cayendo con una relación logarítmica. Si, además, se estudia la desviación estándar de la intensidad del halo, se observa que tiene una tendencia ascendente lo cual sugiere un caso de heterocedasticidad. Estos dos fenómenos se comprobarán y se discutirán en detalle más adelante en la *sección 3.1*.

Dada la situación de heterocedasticidad, obviamente el número de imágenes óptimo (N) a tener en cuenta para realizar un promedio óptimo no es el mismo para todos los casos, depende del brillo del objeto estudiado.

Ahora bien, como el halo de luz incoherente que rodea al pico central está formado por realizaciones de speckle, la intensidad presenta una estadística de speckle, donde el doble de la varianza de la intensidad es igual a la intensidad (*sección 1.3*):

$$2\sigma_S^2 = I_S \quad (1.6)$$

En este trabajo se aprovecha esta característica para desarrollar un algoritmo capaz de disminuir la contribución de la luz incoherente a las imágenes, reduciendo

así la situación de heterocedasticidad y, consecuentemente, permitiendo aumentar el número de imágenes a la hora de promediar así como la resolución de los objetos que se desean detectar.

Se presenta de esta forma, una nueva vía de corrección de imágenes inédita que va más allá de la técnica de *lucky imaging*, basada únicamente en ordenación y selección de las mejores imágenes como se ya ha explicado. Es decir, se propone un procesamiento adicional y posterior a la técnica de *lucky imaging* mejorando los resultados de esta.

1.3. Teoría de Speckle

Se considera luz emitida por una fuente térmica la cual pasa por analizador de polarización orientado según el eje X . La función de valores reales $u_X(P, t)$ representa la componente x del vector de campo eléctrico, observado en el punto P y tiempo t . Debido a la presencia del analizador de polarización, la componente del campo $u_Y(P, t)$ es nula. Esta onda de luz se denominará en lo siguiente como *luz térmica polarizada*.

Dado que la fuente en cuestión es térmica, la forma de onda temporal $u_X(P, t)$ puede ser vista como una suma de muchas contribuciones independientes:

$$u_X(P, t) = \sum_{\text{todos los átomos}} u_i(P, t) \quad (1.7)$$

Donde $u_i(P, t)$ es la componente X de la contribución al campo por el i -ésimo átomo. Dado que el número de átomos radiantes normalmente es muy grande, se puede concluir, con la ayuda del teorema del límite central, que $u_X(P, t)$ sigue un proceso gaussiano aleatorio para una fuente térmica polarizada.

A veces, resulta más conveniente trabajar con la representación analítica de la señal de la onda polarizada $u_X(P, t)$ o alternativamente con la envolvente compleja:

$$A_X(P, t) = u_X(P, t)e^{j2\pi\nu t} \quad (1.8)$$

Donde ν es la frecuencia central de la onda. Para tal representación se tiene:

$$u_X(P, t) = \sum u_i(P, t) \quad (1.9)$$

$$A_X(P, t) = \sum A_i(P, t) \quad (1.10)$$

Donde $u_i(P, t)$ y $A_i(P, t)$ son la señal analítica y la envolvente compleja, respectivamente, de la componente de onda aportada por el i -ésimo elemento radiador. Cuando el teorema del límite central se aplica a la parte real y a la imaginaria de (1.9) y (1.10), se observa que, asumiendo que las distintas contribuciones tienen fases aleatorias e independientes, $u_i(P, t)$ y $A_i(P, t)$ son ambos procesos gaussianos circulares complejos.

Dado que no existe relación entre las fases de cada una de las contribuciones individuales atómicas, es razonable modelar las fases de $A_i(P, t)$ como estadísticamente independientes y uniformemente distribuidas en el rango $(-\pi, \pi)$. Por lo tanto, $A_X(P, t)$ tiene todas las propiedades de una suma de fasores aleatorios. En particular, sus partes real e imaginaria son independientes, idénticamente distribuidas como variables gaussianas aleatorias con media en cero.

Los detectores de radiación óptica no responden a la intensidad del campo, sino a la potencia óptica o intensidad. De esta manera, las propiedades estadísticas de la intensidad de una onda óptica son de alta importancia práctica. Se define la intensidad instantánea $I_X(P, t)$ de la onda polarizada como el módulo cuadrado de la representación de la señal analítica del campo:

$$I_X(P, t) = |\vec{U}_X(P, t)|^2 = |\vec{A}_X(P, t)|^2 \quad (1.11)$$

Se reserva el término intensidad para el promedio temporal, o bajo la asunción de ergodicidad, junto con el promedio de la intensidad instantánea $I_X(P, t)$:

$$I_X(P) = \langle I_X(P, t) \rangle = \bar{I}_X(P, t) \quad (1.12)$$

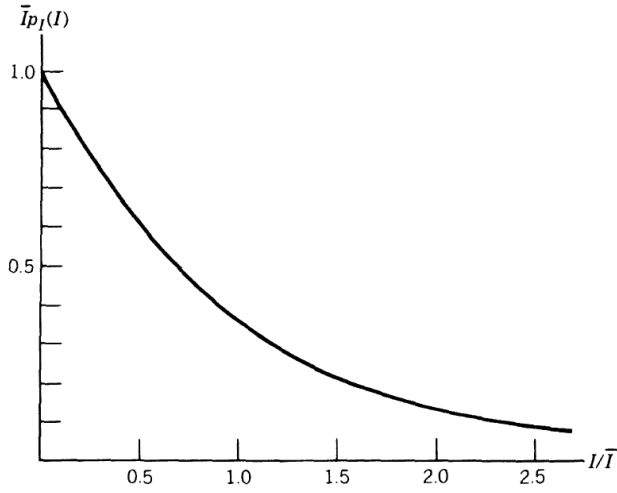
La intensidad instantánea es, por supuesto, un proceso aleatorio. Dado que $I_X(P, t)$ es el cuadrado de la longitud de una suma de fasores aleatorios, se puede encontrar su densidad de probabilidad a primer orden. Por brevedad se usará la notación $A = |\vec{A}_X(P, t)|$, $I = I_X(P, t)$ en la siguiente discusión.

Se conoce que A sigue una función de densidad de probabilidad de Rayleigh:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{A}{\sigma^2} \exp(-A^2/2\sigma^2) & A \geq 0 \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases} \quad (1.13)$$

donde σ^2 representa la varianza de la parte real e imaginaria de $A_X(P, t)$. La transformación $I = A^2$, $A = \sqrt{I}$ es monotónica en $(0, \infty)$, y entonces se puede escribir:

$$P_I(I) = p_A(A = \sqrt{I}) \left| \frac{dA}{dI} \right| = \frac{\sqrt{I}}{\sigma^2} e^{-I/2\sigma^2} \cdot \frac{1}{2\sqrt{I}} = \frac{1}{2\sigma^2} \exp\left(-\frac{I}{2\sigma^2}\right), I \geq 0. \quad (1.14)$$



Por lo tanto, la intensidad instantánea obedece una función de densidad de probabilidad que sigue una exponencial negativa (*figura 1.1*). Esta distribución tiene la propiedad de que su desviación estándar σ_I es igual a su media \bar{I} , siendo las dos iguales a $2\sigma^2$ [6]:

$$\sigma_I = \bar{I} = 2\sigma^2 \quad (1.15)$$

Figura 1.1: intensidad de speckle: función de densidad de probabilidad.

Siendo esta una situación equivalente a la que se encuentra cuando la luz pasa por distintas zonas con una distribución de fase aleatoria en la atmósfera, es decir, es equivalente a la luz incoherente que conforma el halo.

Capítulo 2

Procedimiento

2.1. Métodos de corrección de ruido. Máscaras

La relación 1.15 sólo se cumple cuando existe un patrón de speckle, que aparece cuando la distribución de fase del campo eléctrico incidente es aleatoria. Por consiguiente, si en una zona de la imagen no sólo se encuentra la luz correspondiente al halo sino que además existe un objeto oculto bajo el primero entonces esta relación no se cumple. A partir de este punto, se abre un amplio abanico de posibilidades para trabajar y analizar los datos experimentales con el fin de resaltar el objeto lo más posible sobre el fondo.

Habiendo expuesto la teoría de la distribución de intensidad en un patrón de speckle, es conveniente calcular la desviación estándar de las imágenes para reducir el ruido de éstas y clarificar la imagen aumentando la resolución de objetos y, en definitiva, incrementar el contraste entre objeto y fondo.

A la hora de calcular la desviación estándar en las imágenes resulta necesario identificar como se procederá a realizar este cálculo. Aunque el procedimiento posterior no dependa significativamente del tipo de desviación estándar que se calcule, es cierto que resulta conveniente distinguir dos tipos: la desviación estándar espacial y temporal.

2.2. Desviación estándar espacial

La desviación estándar espacial se calcula independientemente sobre cada imagen, teniendo únicamente en cuenta la distribución espacial de luz. Debido a que se calcula sobre un plano es posible calcular la desviación espacial considerando distintos radios. En principio se elige como mínimo radio 1 (correspondiente a un área de 3x3 píxeles) y máximo radio 2 (correspondiente a un área de 5x5 píxeles). Esta limitación en el valor del radio se debe a que cuando el número de puntos aumenta se tiene, en teoría, una mejor estimación según el punto de vista estadístico, sin embargo, se tiene el inconveniente de que ya no se está estimando la varianza en un punto, sino que se están promediando las varianzas de varios puntos. Esto tampoco supondría un problema si la varianza fuese constante en todo el halo, sin embargo, la intensidad del halo, como se ha expuesto anteriormente en la descripción de la técnica de *Lucky Imaging*, no es constante. Por lo tanto, a medida que se va agrandando el área de estimación también se coge más variación del halo, luego la calidad de la imagen se estaría viendo comprometida. En general, se encuentra que la estimación de la varianza funciona bien con valores del radio aproximadamente en torno a 1.5 píxeles. Sin embargo, aunque estos valores arrojen resultados aceptables, esta configuración subestima el valor de la varianza, que debiera ser igual a la mitad de la intensidad. Aún así, se observa que el comportamiento funcional es el mismo independientemente de su magnitud.

Esta desviación estándar se calcula para cada una de las imágenes que forman el stack, por lo tanto, una vez aplicada la operación de cálculo de la desviación estándar lo que se tiene es un numero de desviaciones estándar igual al número de imágenes existentes en el stack.

2.2.1. Promedio temporal de desviaciones espaciales

Una vez obtenido este stack de desviaciones estándar espaciales se siguen dos procedimientos distintos. En el primero de ellos se calcula el promedio de todas las desviaciones estándar espaciales dando como resultado una única imagen. Con esta nueva imagen promedio de desviaciones estándar resulta posible realizar dos operaciones para resaltar el objeto frente al fondo. Ambos métodos se explican a continuación:

Sustracción de desviación estándar

Por una parte, se tiene el método consistente en la sustracción del promedio temporal del stack de desviaciones espaciales al stack de imágenes originales sin ningún tipo de procesamiento ni máscara aplicados previamente. Este método es esencialmente restar al halo la desviación estándar, lo cual es equivalente a restar el halo ya que la intensidad del halo es igual que la de la desviación estándar por su configuración de Speckle (*sección 1.2*). Sin embargo, en los píxeles donde hay objeto éste se mantiene prácticamente intacto, pero se reduce drásticamente el ruido. Este método, por lo tanto, permite resaltar el objeto sobre el fondo con un mecanismo tan simple como la reducción de la intensidad de este último.

División por desviación estándar

Por otra parte, al stack de imágenes se puede dividir por el promedio temporal del stack de desviaciones espaciales. Al efectuar esta operación resulta el factor 2 (1.15) en los puntos de la imagen en los cuales están contienen información correspondiente únicamente al halo, es decir, resulta una constante en todo el espacio donde se encuentra únicamente halo. Sin embargo, cuando se divide por la desviación estándar alguno de los píxeles en los que existe información de un objeto, éste se potencia. Además, a diferencia del halo, no todos los puntos que contienen información referente a objetos toman el mismo valor tras la operación, sino que cada objeto mantiene su relación de luminosidad con el resto. En definitiva, este método es equivalente a dejar plano el fondo potenciando a su vez el objeto.

En cualquiera de estos dos casos se potencia el objeto frente al fondo que forma el halo. Además, estas dos opciones de procesado, como se desarrollará más adelante (*sección 2.4*), pueden ser independientes o combinadas entre sí para obtener, en principio, mejores resultados. Hecho esto, se soluciona el problema de la heterocedasticidad asociada al aumento de la intensidad del halo conforme se aumenta el número de muestras. Esto es así ya que al restar la varianza creciente se inhibe el crecimiento de la varianza y al dividir sucede el mismo fenómeno.

2.2.2. Stack de desviaciones estándar espaciales

Otra alternativa es utilizar directamente para aplicar los métodos de sustracción y división descritos en la sección anterior (2.2.1) es utilizar directamente el stack que

contiene todas las desviaciones estándar de sendas imágenes del stack original.

En este caso, el procedimiento a seguir es el mismo que el utilizado con el promedio temporal. La diferencia radica en la individualidad de los resultados ya que en este caso se sustrae o se divide a cada imagen del stack original por su respectiva desviación estándar. Es decir, la reducción del ruido se realiza de forma individual e independiente a cada una de las imágenes, en contraposición a lo que ocurre con el método anterior en el que todas las imágenes son modificadas por la misma desviación estándar. Por lo tanto, se espera así un mejor resultado al aplicar los métodos de sustracción y división directamente con el stack de desviaciones estándar, ya que éste mantiene las características individuales del ruido en cada una de las imágenes.

2.3. Desviación estándar temporal

Del mismo modo que se puede utilizar la desviación estándar espacial, es decir, la desviación calculada en cada una de las imágenes, también es posible calcular la desviación temporal. La desviación estándar temporal se calcula sobre los valores temporales de un punto fijo del espacio. Por lo tanto, es este caso y a diferencia del cálculo espacial, al calcular la desviación estándar temporal de un stack de imágenes sólo se obtiene una imagen correspondiente a la desviación estándar temporal cuyas dimensiones son exactamente las mismas a las dimensiones de las imágenes del stack original de partida.

Dicho esto, el procedimiento a seguir una vez se obtiene la imagen que contiene la desviación estándar temporal es el mismo descrito para el promedio temporal de desviaciones espaciales (*sección 2.2.1*). Aplicando de igual forma el método de sustracción y división.

2.4. Combinación de máscaras

Una vez descritas todas las técnicas simples de procesamiento que se usarán, también es posible procesar las imágenes mediante ciertas combinaciones de las distintas máscaras.

Estas combinaciones se pueden llevar a cabo antes del procesado final combinando distintas máscaras o combinado imágenes obtenidas tras aplicar el procedimiento de procesado por completo

2.5. Procesamiento posterior

Una vez se aplica cualquiera de estos dos métodos (ya sea sustracción o división), se obtiene un stack con un número de imágenes igual al del stack original. A partir de este punto, se calcula el promedio de todas las imágenes del stack y entonces se obtiene una sola imagen del sistema planetario que se desea estudiar con una reducción considerable del halo y, por consiguiente, del ruido que impide detectar objetos débiles.

Ahora bien, para conseguir un mayor contraste en la imagen obtenida y poder aumentar la resolución y, consecuentemente, la capacidad para distinguir ciertos objetos débiles se aplica un procesado de filtro laplaciano. Este filtro permite acusar los cambios de intensidad en la imagen, lo cual mejora la resolución de la misma.

2.5.1. Procesado sin máscaras

También se puede destacar un método mucho más simple que además, no arroja tan buenos resultados como los anteriores por la falta de procesado.

Es posible realizar el procesado descrito en la *sección 2.5* directamente sobre el stack de imágenes originales, es decir, sin necesidad de aplicar ningún tipo de máscara y procesado de los discutidos previamente. Este método consiste simplemente en promediar directamente el stack original para luego aplicar el filtro laplaciano.

Puede parecer poco interesante desde el punto de vista de los objetivos que se persiguen. Sin embargo, da una idea de la sencillez del método y la buena relación complejidad-resultados, dado que la imagen resultante que permite alcanzar este último método es suficientemente buena como para distinguir claramente una gran cantidad de objetos absolutamente imposibles de distinguir en las imágenes originales (*sección 3*).

Capítulo 3

Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras aplicar los algoritmos pertinentes en cada caso para conseguir limpiar el ruido de fondo y realzar los objetos del sistema planetario Kepler-21 (K21).

Todo el procesado se realizó con las 533 mejores imágenes del sistema en cuestión, es decir, las imágenes cuyo pico de intensidad máxima proveniente de la luz emitida por la estrella es más alto y por consiguiente hay una mayor distribución de luz coherente. En la siguiente sección se pueden encontrar los resultados obtenidos tras el análisis de la evolución del punto más brillante de cada imagen en función del número que ésta ocupa en la serie (ordenadas de mayor a menor intensidad).

3.1. Calidad de las imágenes

Se toman cuatro cubos de cinco mil imágenes cada uno, entonces se seleccionan, por ejemplo, las quinientas mejores imágenes de todas ellas. El criterio de selección se basa en la cantidad de energía coherente que se tiene en cada una de las imágenes i.e. cuanto más alto es el pico, mejor es la imagen, como ya se detalló en la introducción. Ahora bien, si el algoritmo de promedio se aplica sobre selecciones que contienen un número diferente de imágenes (N) el resultado que se obtiene es distinto ya que para el valor medio de la intensidad se tiene:

$$\bar{i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n \quad (3.1)$$

Esta estimación de intensidad tiene asociado un determinado error. Es posible reducir el error aumentando el número de muestras. En el caso de que todas las muestras

aportasen la misma contribución al error bastaría con aumentar N hasta un valor muy alto ($N \rightarrow \infty$). Sin embargo, se observa que la varianza aumenta proporcionalmente al número de muestras debido a la situación de heterocedasticidad, la cual se discutirá en detalle en la *sección 3.3*. Dicho esto, seleccionar más imágenes no sólo no reduce el error, sino que empeora el resultado del algoritmo. En esta situación se encuentra el dilema entre número de muestras o calidad de estas, es decir, cuál es el valor óptimo de N que permite obtener los mejores resultados.

Lo primero que se intentó para comprobar hasta que punto es determinante para el análisis este dilema fue representar la intensidad del pico (de unas 500 imágenes) para distintas estrellas y distintos telescopios en función del número de imagen. Se observó que la intensidad en función del número de imagen tenía un comportamiento de decaimiento logarítmico de la forma:

$$I(n) = a \ln(n) + b \quad (3.2)$$

Efectivamente, en el caso del sistema que ocupa este trabajo (con 533 imágenes) esta relación de decaimiento logarítmico de la intensidad del pico central se cumple. Este comportamiento se puede observar a continuación en la *Figura 3.1*.

Se observa, tal y como se plantea en la teoría, un rápido decaimiento de la intensidad de luz en el pico coherente de la imagen conforme se aumenta el número que esta ocupa en el cubo de imágenes ordenadas según el pico de mayor a menor intensidad.

Ahora bien, resulta fundamental saber que si existe un planeta en un determinado sistema, el planeta no emite luz por sí mismo, solamente refleja la luz de la estrella luego la luz recibida por ambos objetos vibra en fase, es decir, ambas son coherentes entre sí. Además, dada una cierta relación de intensidades entre estrella y planeta, para las primeras imágenes de la lista ordenada por intensidad (las más definidas, las que contienen luz menos afectada por las aberraciones atmosféricas) la intensidad del planeta también puede ser suficientemente alta como para sobresalir del ruido, de la luz incoherente del halo. Sin embargo, a medida que se analizan más imágenes la intensidad del pico va cayendo, es decir, disminuye la cantidad de energía recibida en forma de luz coherente. Este aumento en la luz incoherente dificulta la detección de objetos únicamente reflectantes pues no son, por lo general y siempre por debajo de la luminosidad de la estrella, suficientemente brillantes como para sobrepasar el umbral del ruido. Además, si a esta condición de poca intensidad de luz coherente recibida en el telescopio tras ser reflejada por objetos se le suma el problema de la hetero-

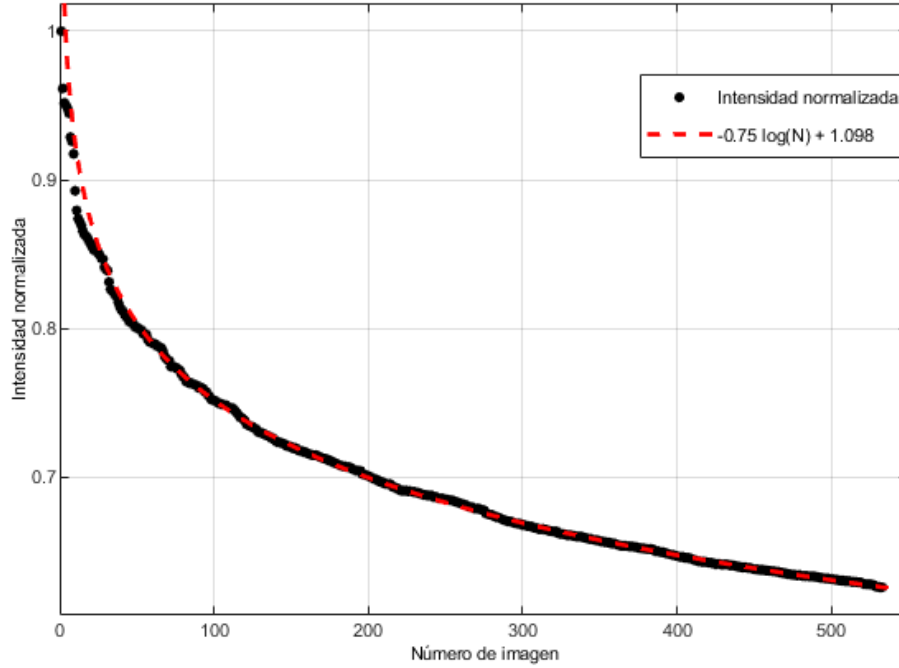


Figura 3.1: Intensidad del pico central, luz coherente proveniente de la estrella del sistema K21. El decaimiento sigue la ecuación de ajuste: $-0.75 \ln(N) + 1.098$

dasticidad (varianza creciente) se encuentra una situación totalmente desfavorable a la hora de detectar e identificar objetos poco brillantes.

En la *Figura 3.2* se muestra el mismo perfil de intensidad del pico coherente que en la *Figura 3.1* pero en comparación con tres objetos únicamente reflectantes de distinto calibre en comparación con la estrella así como el ruido causado por el halo. Se observa que, en efecto, para las primeras imágenes del stack, las que tienen una mejor calidad, el ruido es despreciable para los objetos más brillantes. Sin embargo, conforme el número de imagen aumenta la cantidad de luz correspondiente al pico coherente disminuye y como consecuencia también lo hace la luz reflejada por los objetos de menor intensidad hasta tal punto que estos últimos son totalmente ocultados por el halo.

El cociente señal ruido va disminuyendo para todos los objetos a medida que aumenta el número de imagen. Sin embargo, este cociente señal ruido es diferente tanto para la estrella como para el planeta. De hecho, el número óptimo de imágenes puede no ser el mismo para los distintos objetos. En el caso de la estrella, se puede llegar a valores de N más altos y la señal sigue estando por encima del ruido (*Figura 3.2*). Sin

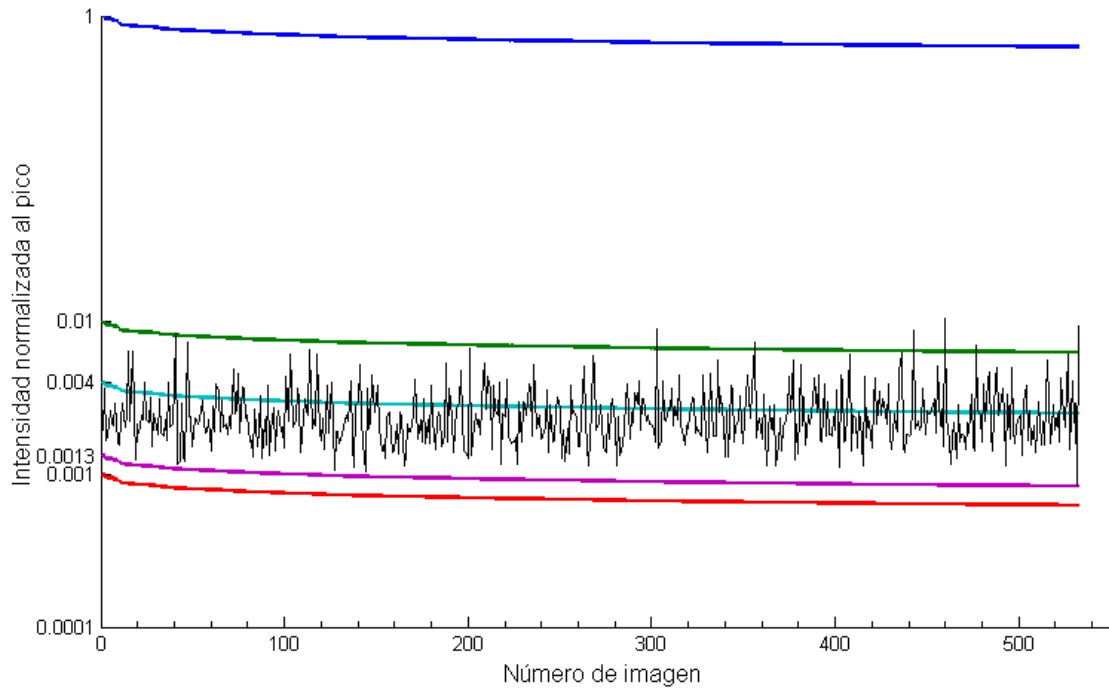


Figura 3.2: Intensidad del pico central, objetos reflectantes y ruido existente como consecuencia de la existencia de halo.

embargo, el caso del planeta dado que la intensidad es mucho más baja, la intensidad del ruido alcanza la intensidad coherente del planeta en un número N mucho más bajo.

Por lo tanto, en el caso en el que se quieran analizar sistemas compuestos por compañeros más grandes y, por lo tanto, también más intensos, el número de imágenes óptimo podrá ser mayor. En caso de que el compañero sea mucho más pequeño el número de imágenes óptimo será sustancialmente menor.

La solución que se propone en este trabajo para mejorar el cociente señal ruido para objetos débiles es eliminar, o al menos reducir, el problema de la heterocedasticidad. Permitiendo de esta forma realizar la estadística con un mayor número de imágenes incluso en el caso de objetos menos brillantes.

Para lograr este objetivo se siguen dos pasos: primero, caracterizar de forma general la naturaleza y comportamiento del halo (*sección 3.2*) y, segundo, realizar un análisis detallado del problema de la heterocedasticidad (*sección 3.3*).

3.2. Caracterización del halo

Se discute ahora la composición y comportamiento del halo y su importancia a la hora de diseñar los algoritmos para clarificar las imágenes en busca de objetos reflectantes de la luz emitida por la estrella del sistema.

Tal y como se expuso en la introducción, el halo está formado por luz incoherente que sigue la estadística de speckle. Por lo tanto, si se selecciona una región aleatoria correspondiente al halo suficientemente representativa de un stack de imágenes y se observa su evolución temporal, se espera encontrar que la intensidad en esta región es el doble de la intensidad de su desviación estándar según Eq.(1.15).

A continuación en la *Figura 3.3* se muestra la evolución de la intensidad media de una selección aleatoria del halo de dimensiones 5x5 píxeles en función del número de imagen ordenadas de mayor a menor intensidad:

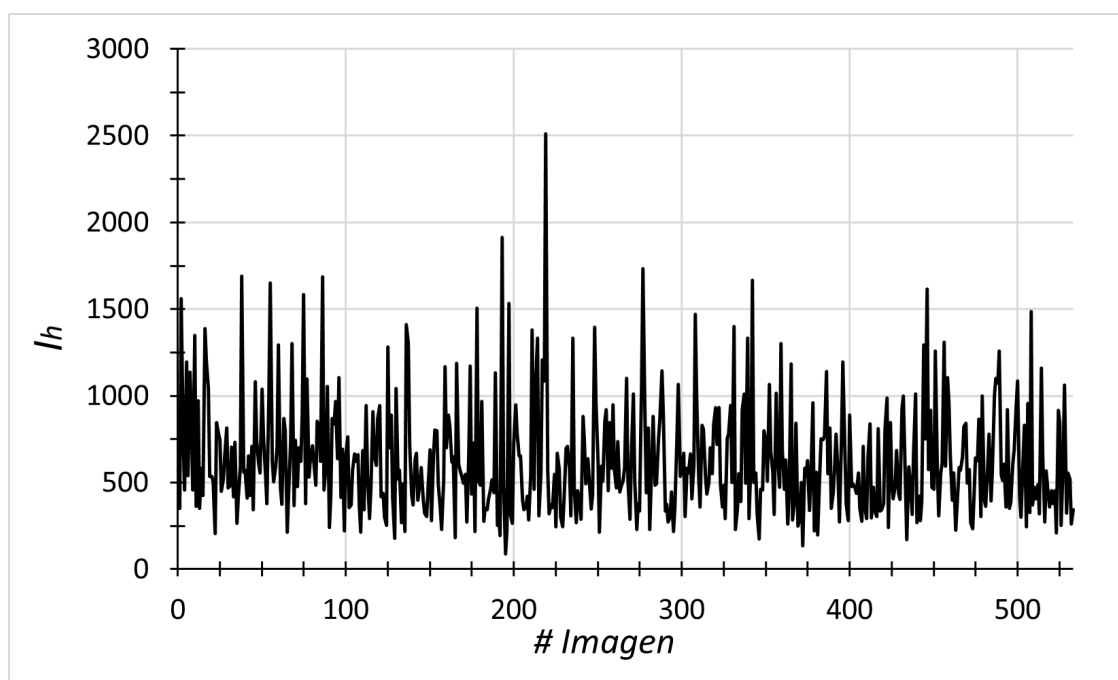


Figura 3.3: Intensidad correspondiente a una sección del halo seleccionada aleatoriamente. *Unidad de intensidad arbitraria, escala de grises fija.

Se observa una distribución de intensidades aleatoria centrada en torno a 600u* y una ligera tendencia descendente conforme aumenta el número de imagen como es

natural al estar estas ordenadas por intensidad descendente.

A continuación se calcula la desviación estándar de cada una de las imágenes del stack original generando un nuevo grupo de imágenes. Es decir, se tiene ahora un stack cuyo número de imágenes es el mismo que el del stack original y cada una de estas nuevas imágenes representa la desviación estándar de sendas imágenes del stack original. Seleccionando ahora la misma sección de las imágenes que se utilizó para obtener la *figura 3.3*, y representando de igual forma la intensidad de esta sección en función del número de imagen se obtiene la siguiente *figura 3.4*:

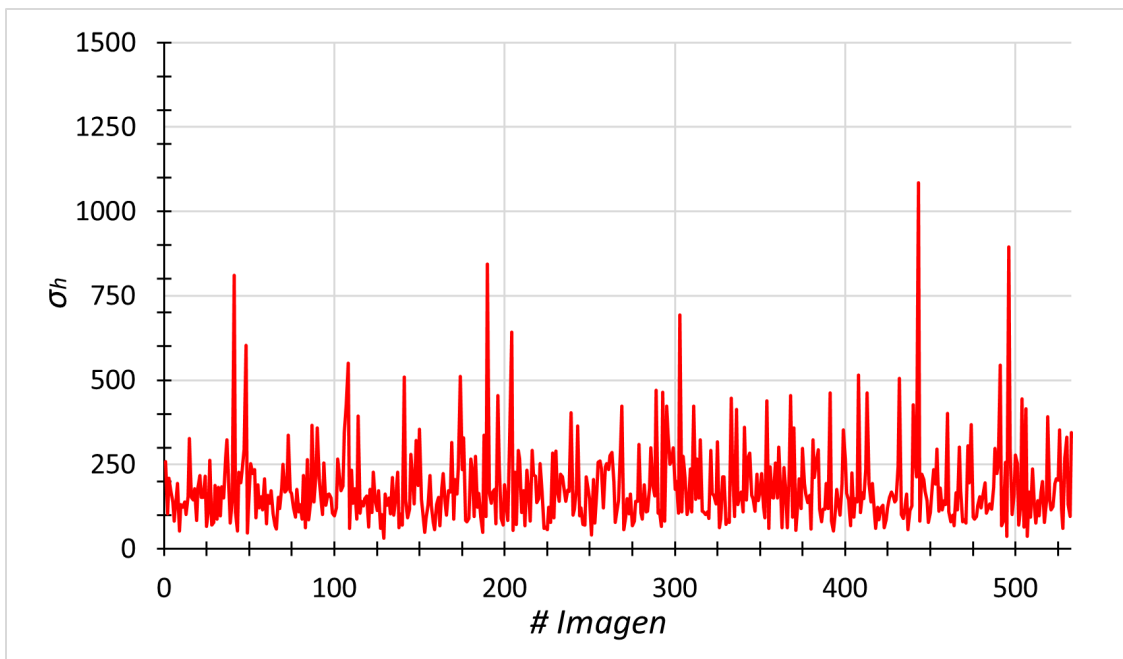


Figura 3.4: Desviación estándar de la misma sección del halo caracterizada en 3.3.

Se puede observar una distribución aleatoria de desviaciones estándar al igual que ocurre en la *figura 3.3*. Sin embargo, en este caso, y como era esperable por la teoría de speckle, se obtiene un valor medio de la intensidad en torno a 250u (1.15).

Además en este caso se puede apreciar una ligera tendencia ascendente, perfectamente explicable como un caso de heterocedasticidad, donde la variable que aumenta la varianza de la muestra es precisamente el número de muestras, el número de imágenes. Este efecto se discutirá en detalle más adelante en la *sección 3.3*.

Una vez calculado el stack que contiene las desviaciones estándar temporales de una sección del halo de cada una de las imágenes es posible restarlo del stack original con el objetivo de reducir el ruido de las imágenes originales y permitir de este modo resaltar los objetos poco brillantes. Se muestra en la *figura 3.5* el resultado de esta corrección donde se aprecia la significativa reducción de la intensidad del halo, pasando a un valor medio de 600u en las imágenes originales como se muestra en la *figura 3.3* a una distribución aleatoria centrada en 200u, un valor mucho más bajo. Esta reducción en la intensidad del halo (luz incoherente) repercutirá posteriormente en una mejor capacidad de análisis de las imágenes y consecuentemente un incremento en la capacidad para distinguir y detectar nuevos objetos poco luminosos.

Además, es también especialmente destacable la reducción que tiene lugar en los picos; en la *figura 3.3* se pueden observar valores máximos en torno a 1700u con picos superando los 2000u. Sin embargo, tras la corrección se observa como los picos máximos rondan valores en torno a 600u con ciertos máximos con valores en torno a 1000u pero en ningún caso se superan los 1200u lo cual supone una reducción de la intensidad del halo y, por lo tanto, de la luz incoherente y ruido satisfactoria para llevar a cabo el procesamiento posterior.

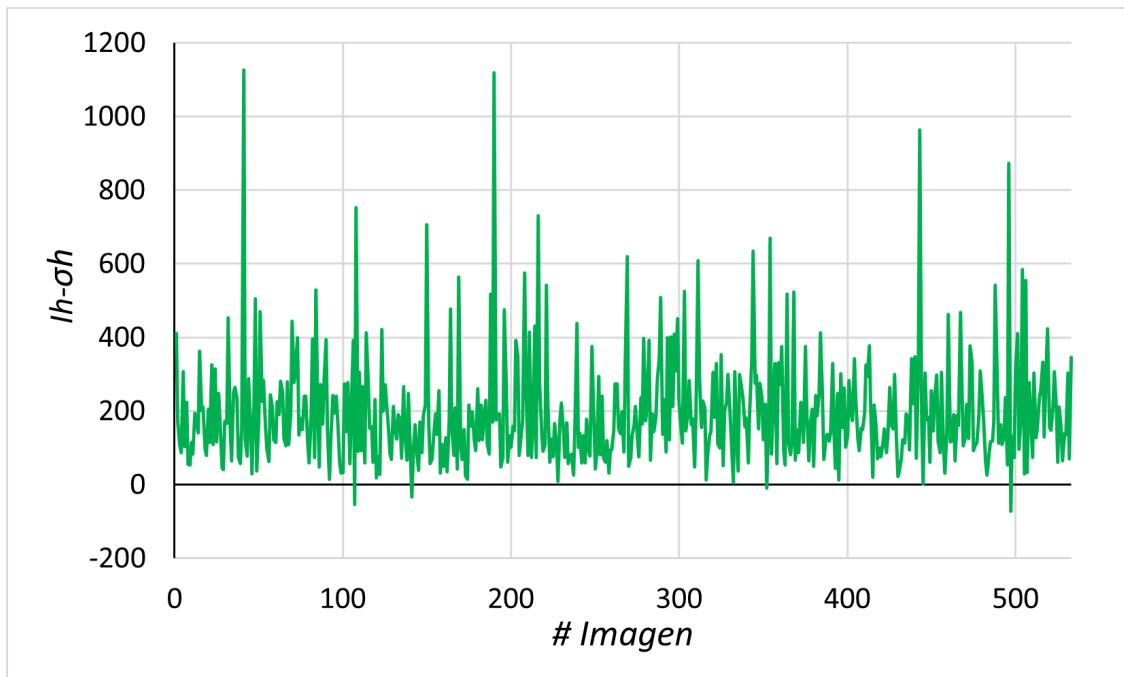


Figura 3.5: Intensidad del halo menos su desviación estándar.

3.3. Estudio de la heterocedasticidad

Tal como se expuso en la introducción, y ya se ha constatado en la *sección 3.1* (*figura 3.2*), una de las principales desventajas del uso de la técnica de *Lucky Imaging* para el procesado de imágenes es el incremento del ruido, o disminución de la calidad de imagen, conforme aumenta el número de imagen (partiendo siempre de un stack de imágenes ordenadas por intensidad del pico de luz coherente). Por lo tanto, se tiene un claro caso de heterocedasticidad cuya variable causal es precisamente el número de imágenes. Ya en la *figura 3.4* cuando se habla de la desviación estándar del halo se puede observar una ligera tendencia ascendente de esta magnitud conforme el número de imagen aumenta.

A continuación, se vuelve a analizar una sección de 5x5 píxeles correspondiente al halo, calculando la desviación estándar de esta sección para todas las imágenes del stack. Normalizando el resultado se obtiene la *figura 3.6*:

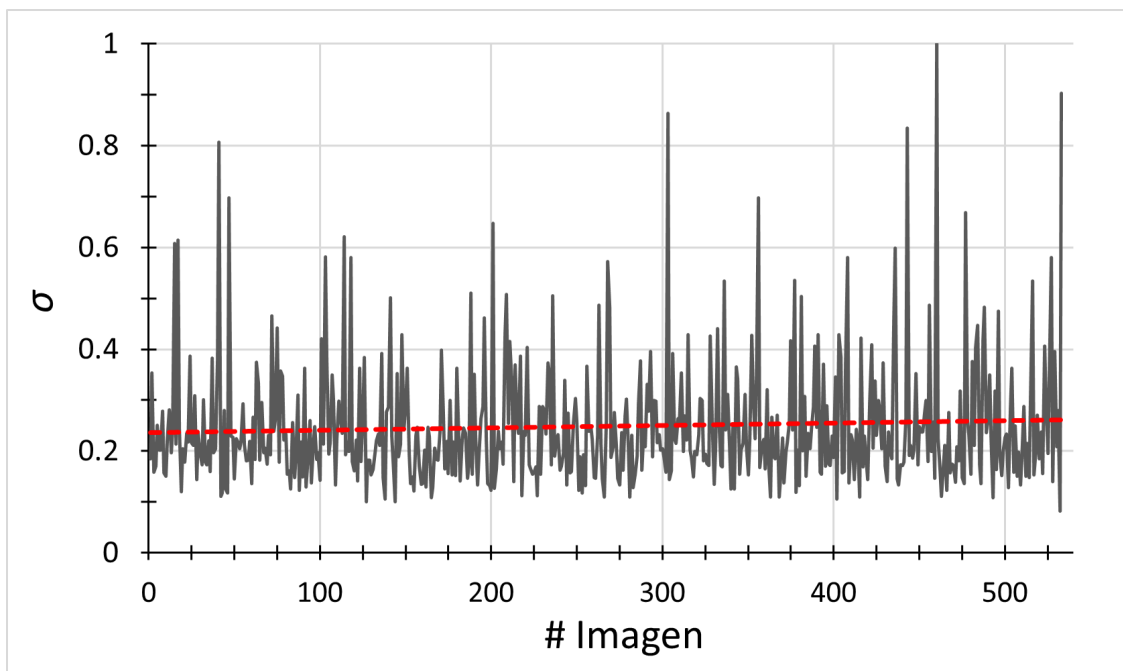


Figura 3.6: Desviación estándar espacial normalizada de una sección aleatoria del halo. Se observa su tendencia ascendente, la cual sigue la ecuación de ajuste:

$$\sigma = 5 \cdot 10^{-1}N + 0,2354. \quad (N=\#Imagen).$$

Si ahora se resta al stack de imágenes original el stack de desviaciones estándar y

se vuelve a calcular la desviación estándar del resultado en la misma sección espacial se obtiene una distribución de intensidad normalizada como se muestra en la *figura 3.7*.

En este caso se observa que la operación de sustracción tiene un efecto muy positivo a la hora de corregir el ruido introducido por el halo. No solamente reduciendo su valor absoluto como ya se ha discutido en la sección anterior a partir del resultado expuesto en la *figura 3.5* sino que además, esta sustracción permite eliminar la condición de heterocedasticidad como se muestra en la *figura 3.7* donde se puede observar como la tendencia ascendente de la desviación estándar del stack original (sin ninguna corrección aplicada) se ha reducido en un factor 10^4 .

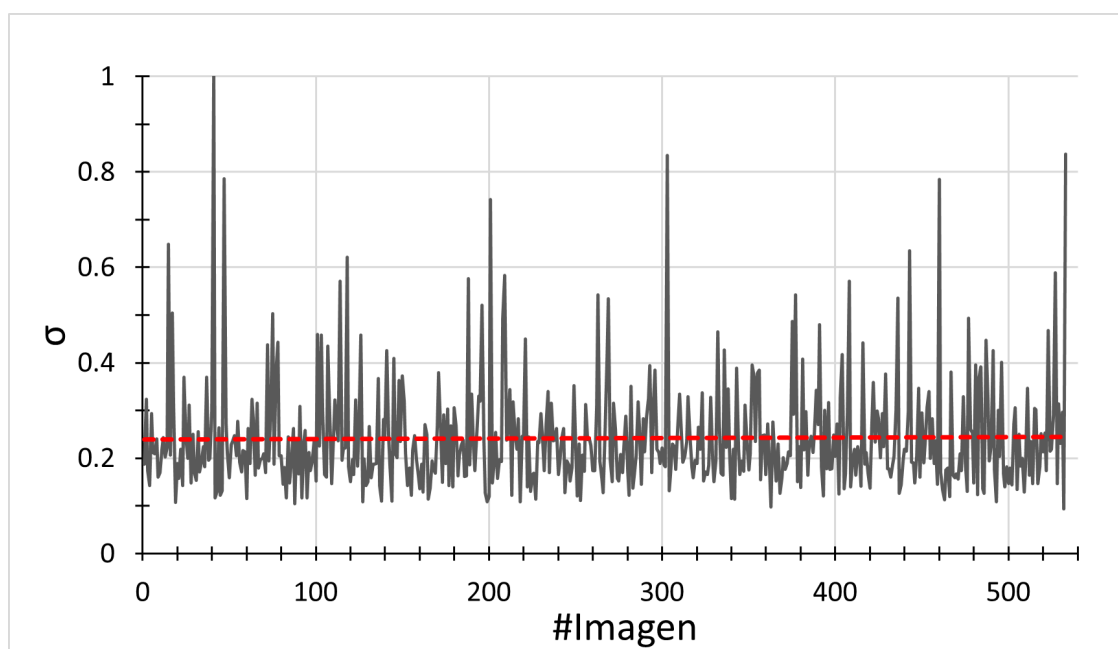


Figura 3.7: Desviación estándar espacial normalizada de una sección aleatoria del halo una vez restada la desviación estándar. $\sigma = 1 \cdot 10^{-5}N + 0,2396$.

3.4. Procesado básico: promedios

Antes de presentar los resultados obtenidos mediante la implementación de algoritmos más elaborados conviene poner una referencia del procesado más básico, es decir, el promedio de las mejores imágenes sin ningún tratamiento posterior.

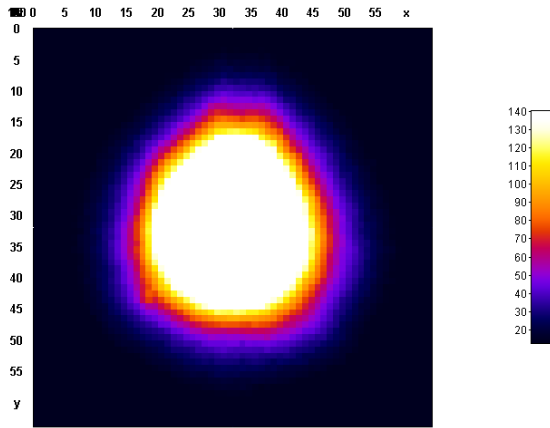


Figura 3.8: Promedio del stack con las mejores 533 imágenes. Se aprecia sutilmente el objeto en el borde del halo.

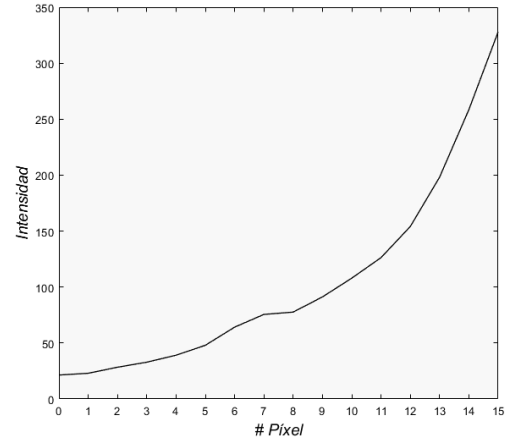


Figura 3.9: Perfil de intensidad del promedio del stack con las mejores 533 imágenes.

Se presentan ahora las imágenes resultantes de promediar directamente tanto el stack con las mejores imágenes como el mismo stack dividido por la desviación estándar espacial así como sus perfiles de luminosidad que pasan por un punto que contiene un objeto:

Por una parte, en la *figura 3.8* se observa la imagen resultante del promedio del stack de las 533 mejores imágenes. Como se puede apreciar a simple vista, es una imagen formada únicamente por una gran mancha de luz circular que cubre prácticamente cualquier objeto. De hecho, aunque es cierto que observando el perfil de la *figura 3.9* se puede apreciar una ligera variación de la tendencia ascendente de la curva de luminosidad del halo en el punto donde se encuentra el objeto, la resolución de este es muy pobre hasta tal punto de estar casi totalmente ocultado por el halo.

Por otra parte, en la *figura 3.10*, se observa el resultado del promedio del stack de imágenes una vez cada una de ellas ha sido dividida por su desviación estándar espacial. Se aprecia en este caso, de forma más evidente analizando el perfil de la *figura 3.11*, que, efectivamente, los métodos que se presentan a continuación, basados en la estadística de speckle, son capaces de descubrir de forma clara el objeto por encima de la mancha de luz formada por el halo.

De hecho, se observa en este último resultado que simplemente tras dividir a cada

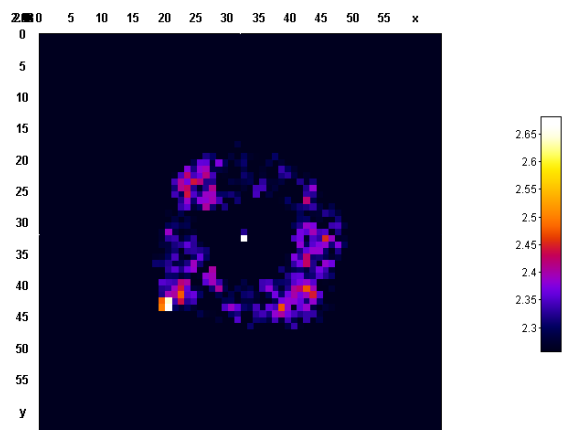


Figura 3.10: Promedio del stack de las imágenes dividido por su desviación estándar espacial. Se observa la estrella así como el objeto claramente.

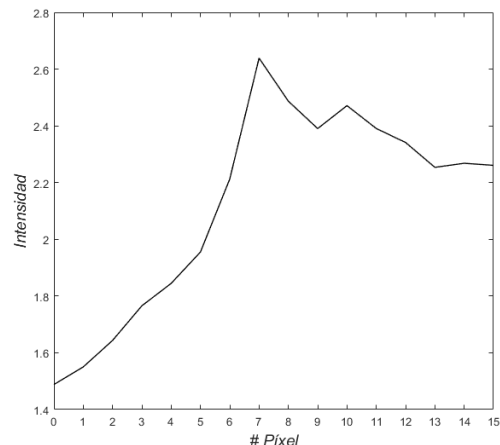


Figura 3.11: Perfil de intensidad del promedio del stack de las imágenes dividido por su desviación estándar espacial.

una de las imágenes del stack original por su desviación estándar espacial y promediar el stack resultante la estrella es claramente visible así como objetos brillantes. Es decir, se consiguen descubrir objetos sin necesidad de aplicar ningún tipo de filtro o procesamiento posterior al promedio, poniendo en evidencia el enorme potencial de este método de procesamiento de imágenes basado, de nuevo, en la naturaleza de speckle del halo.

Como último comentario sobre este procesamiento mejorado, basado en la división por la desviación estándar, es interesante destacar la incapacidad del método para eliminar por completo el ruido. Sin embargo, esto se explica por la introducción de ruido en las imágenes independiente del halo, ya que a medida que la distancia respecto a la estrella aumenta la contribución del halo al ruido disminuye. Esto implica que, a medida que se aumenta el radio, la contribución de speckle al ruido total disminuye. Por lo tanto, el método sí es capaz de eliminar el ruido de speckle pero no el de otras fuentes (las cuales dominan a distancias grandes).

3.4.1. Centrado y promedio

Se muestra ahora el resultado obtenido tras la aplicación del algoritmo detallado en la *sección 2.5.1* el cual se basa únicamente en promediar temporalmente el stack de las mejores imágenes, resultado ilustrado en la *figura 3.8*, aplicar el filtro laplaciano y umbralizar a cero la intensidad. A pesar de su simplicidad, como se puede apreciar en la *figura 3.12*, este algoritmo básico es suficiente para distinguir la estrella, el objeto y parte de algunos de los anillos de Airy.

A partir de este punto, en este trabajo se presentan algoritmos más sofisticados con la capacidad de superar los resultados obtenidos por este último, el hasta ahora utilizado por la técnica de *Lucky Imaging*.

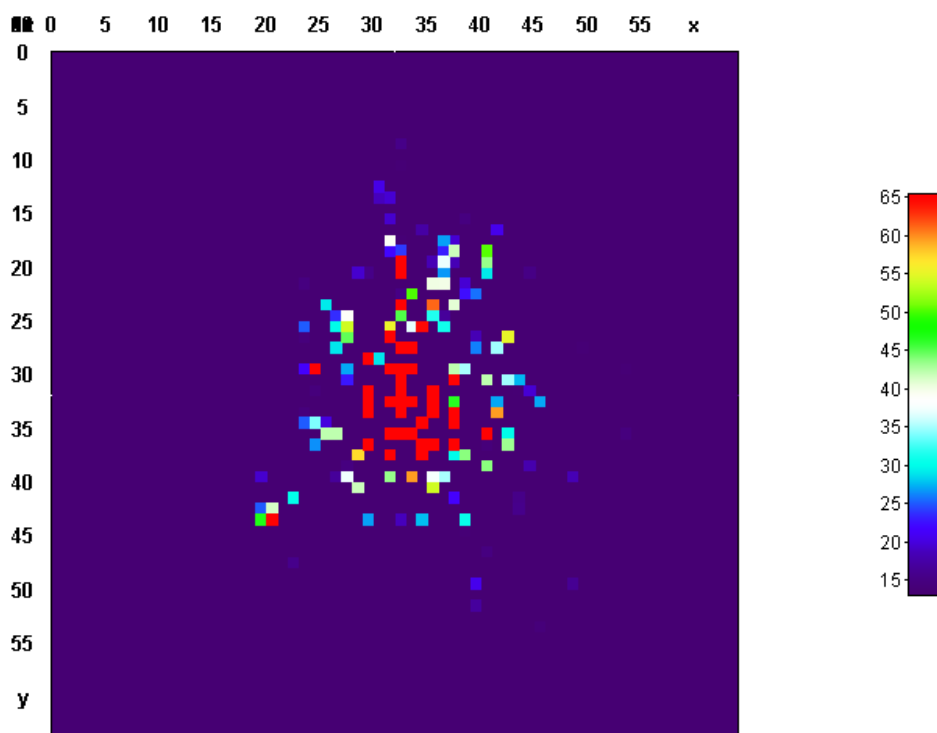


Figura 3.12: Resultado obtenido tras la aplicación del algoritmo simple consistente únicamente en promediar el stack. Obteniendo un valor $\text{SNR}=2.57$ para el potencial objeto situado en (19,43).

3.5. Procesado de nivel I

A la hora de procesar las imágenes con el objetivo de eliminar la mayor cantidad de ruido manteniendo intactos e incluso potenciando los objetos se comenzó aplicando máscaras sencillas e independientes entre sí de sustracción y división de la desviación estándar (Cf.2.2.1), tanto para desviaciones calculadas espacial como temporalmente.

3.5.1. Sustracción de desviación estándar espacial

En primer lugar se presentan los resultados obtenidos al aplicar el método de procesado consistente en la sustracción de la desviación estándar espacial al stack de imágenes originales. Como ya se detalló en la sección del procedimiento, este proceso es posible realizarlo con el stack de desviaciones o con el promedio de este. A continuación se detallan los resultados obtenidos por ambos submétodos del procesado.

Stack

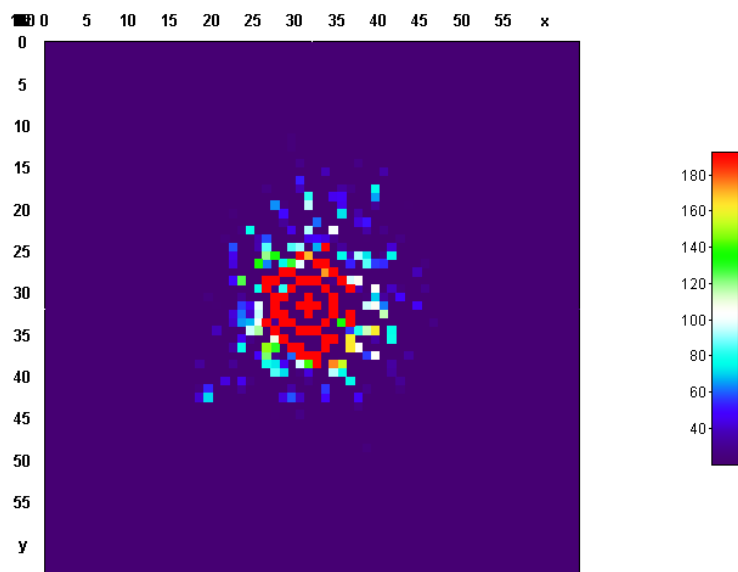


Figura 3.13: Procesado del stack de imágenes originales mediante la sustracción del stack de desviaciones estándar espaciales.

Al sustraer el stack de desviaciones estándar espaciales del stack original y aplicar el procedimiento posterior detallado en la *sección 2.5* se obtiene el resultado mostrado

en la *figura 3.13*.

Se puede observar un alto nivel de detalle en el pico central correspondiente a la estrella y los dos primeros anillos de Airy e incluso ciertas partes del tercero. También es posible identificar a simple vista una estructura con alta probabilidad de ser un objeto en la posición (19,43).

Sin embargo, aunque este procesado sea capaz de limpiar una gran cantidad de ruido de fondo, no es suficiente para resaltar claramente los potenciales objetos existentes en el sistema sobre del fondo.

Promedio

Sustrayendo el promedio temporal del stack de desviaciones estándar temporales a cada una de las imágenes del stack original y aplicando, de nuevo, el procedimiento posterior detallado en la *sección 2.5* se obtiene el resultado mostrado en la *figura 3.14*.

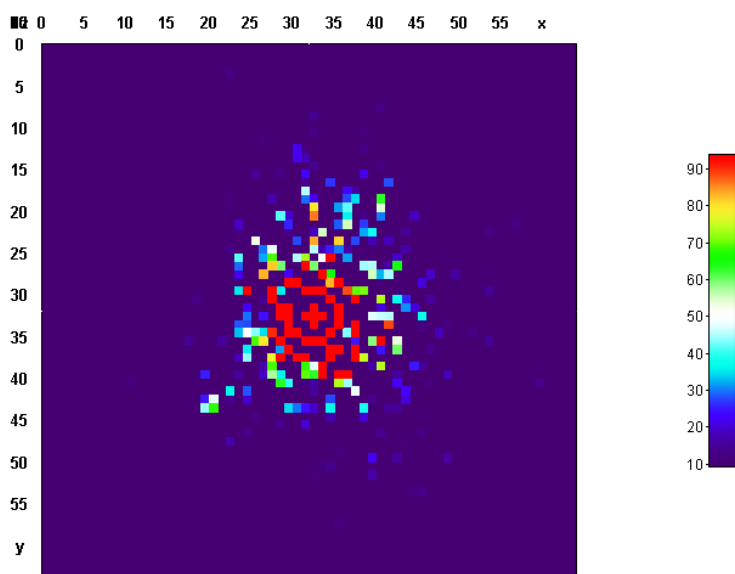


Figura 3.14: Procesado del stack de imágenes originales mediante la sustracción del promedio temporal del stack de desviaciones estándar espaciales.

Se puede apreciar en este caso una cantidad de ruido de fondo ligeramente mayor a la obtenida mediante la sustracción directa del stack (*Cfr. figura 3.13*). En el caso de la resta del promedio se observa una pérdida de definición por aumento del ruido

de fondo tanto en los anillos de Airy como en el propio objeto, ya detectado en el procesamiento anterior.

3.5.2. División por desviación estándar espacial

En segundo lugar se presentan los resultados obtenidos al aplicar el método de procesamiento mediante la división del stack original por la desviación estándar espacial. Al igual que en el caso de la sustracción, al tratarse de desviación espacial, este procesamiento se puede llevar a cabo tanto con el stack de desviaciones como con el promedio de este. A continuación, se detallan los resultados obtenidos por ambos submétodos de procesamiento.

Stack

En la *figura 3.15*, se muestra el resultado del procesamiento por división del stack de desviaciones estándar espaciales. Se observa una mayor limpieza en la imagen en relación con la estrella, los anillos de Airy y el objeto con respecto al procesamiento anterior basado en la sustracción. Tal como se esperaba, el método de división ofrece mejores resultados, al menos visuales (*SNR: tabla 3.1*), como consecuencia de ser capaz de potenciar el objeto sobre el fondo lugar de, como se ha discutido en el proceso de sustracción (*sección 3.2*), únicamente reducir el ruido de fondo.

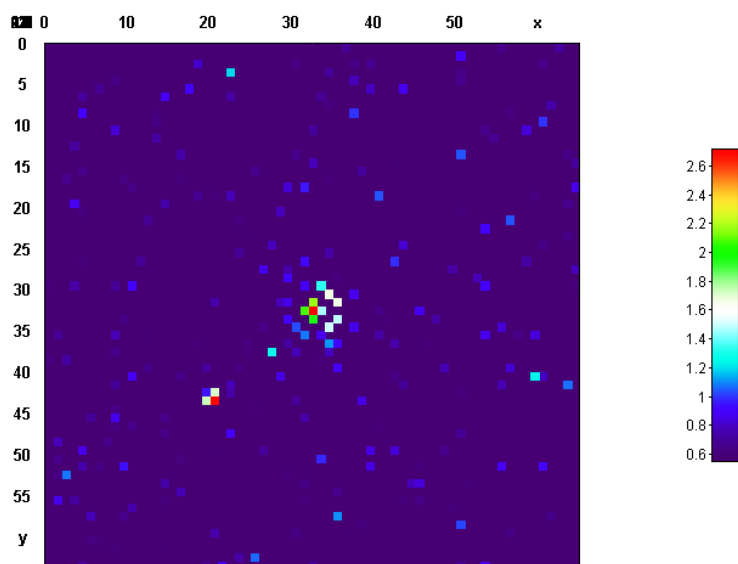


Figura 3.15: Procesado del stack de imágenes originales mediante la división por el stack de desviaciones estándar espaciales.

Promedio

Dividiendo por el promedio temporal del stack de desviaciones estándar espaciales a cada una de las imágenes del stack original y aplicando el procedimiento posterior habitual se obtiene en este caso la imagen de la *figura 3.16*

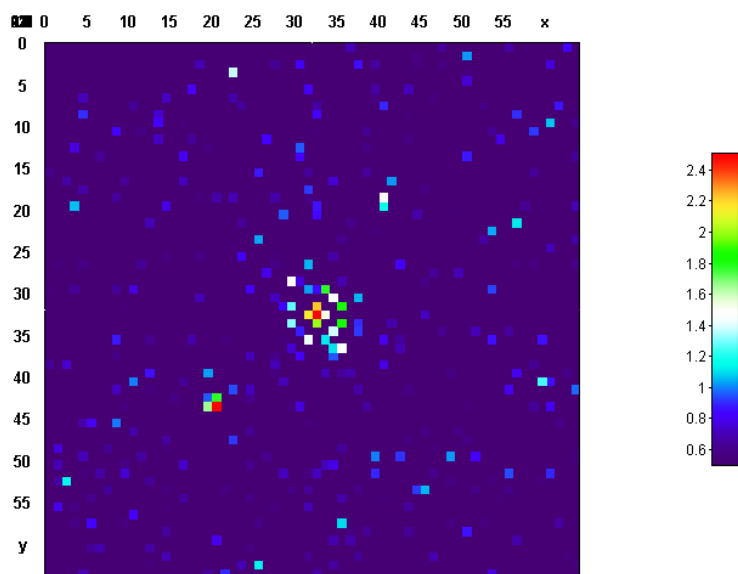


Figura 3.16: Procesado del stack de imágenes originales mediante la división del mismo por promedio temporal del stack de desviaciones estándar espaciales.

Se puede apreciar en este caso una cantidad de ruido de fondo ligeramente mayor a la obtenida mediante la división directa del stack (*Cfr. figura 3.15*). En el caso de la división por del promedio se observa una pérdida de definición por aumento del ruido de fondo tanto en los anillos de Airy y, especialmente, entorno al propio objeto.

3.5.3. Sustracción de desviación estándar temporal

Del mismo modo y tal como se detalla en el *capítulo 2* se pueden llevar a cabo las mismas operaciones de sustracción y división haciendo uso de la desviación estándar temporal. En este caso, sin embargo, sólo es posible realizar el cálculo con el promedio. El resultado de este procesado se muestra en la *figura 3.17*

Se puede observar en este caso una gran cantidad de ruido de fondo existente la cual hace prácticamente imposible distinguir, al menos a simple vista (ver tabla 3.1

para SNR), el objeto. De hecho, este procesado no es capaz de resolver los anillos de Airy, simplemente muestra ciertas partes de éstos y totalmente camuflados entre el ruido.

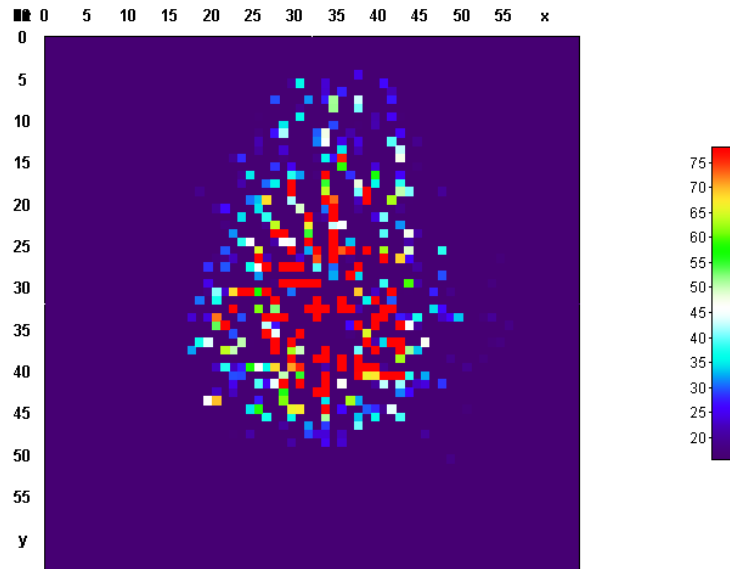


Figura 3.17: Procesado del stack de imágenes originales mediante la sustracción de la desviación estándar temporal.

3.5.4. División de desviación estándar temporal

Por último, dentro de esta categoría de procesados de primer nivel, se divide cada una de las imágenes del stack original por la desviación estándar temporal del mismo. El resultado obtenido se muestra en la *figura 3.18*

En este caso, aún siendo cierto que existe una gran cantidad de ruido, tanto la estrella como el objeto están siendo potenciados y, en consecuencia, son mucho más visibles que en el caso de la sustracción 3.17. Resulta también interesante destacar de esta última imagen, la ausencia total de los anillos de Airy.

Por último, y principalmente en vistas a fines prácticos, es imprescindible abandonar el análisis cualitativo para clasificar los métodos discutidos de forma objetiva con el fin de realizar un análisis cuantitativo de los mismos. De hecho, aunque a simple vista parezca que los procesados basados en la desviación ofrecen mejores resultados,

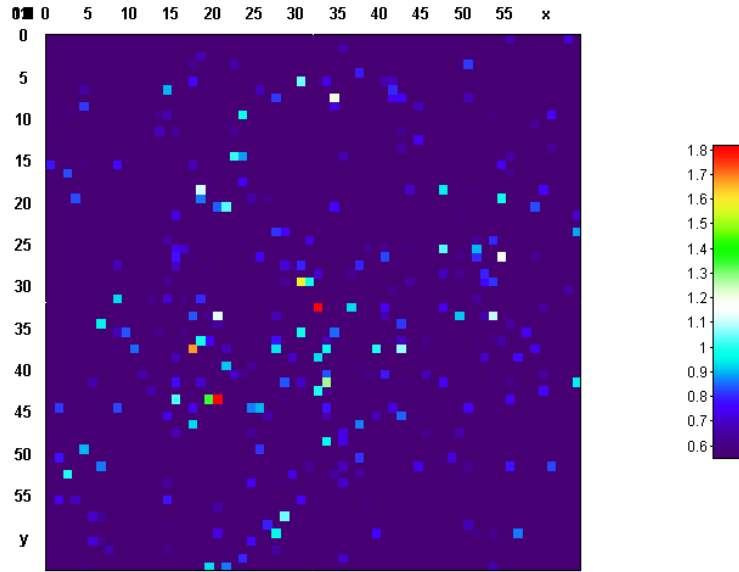


Figura 3.18: Procesado del stack de imágenes originales mediante la división por la desviación estándar temporal.

cuantitativamente (3.1) se observa que ocurre justo lo contrario. Este fenómeno se discutirá en detalle en la *sección 3.6.6*.

3.5.5. Cocientes señal ruido

Por lo tanto, vez obtenidos los resultados de los seis tipos diferentes de procesado se calcula el cociente señal ruido del objeto. Se usará cada uno de ellos como herramienta que permite distinguir y clasificar los procesados objetivamente según su capacidad de potenciar y resaltar el objeto sobre el ruido de fondo.

En la *tabla 3.1* se recogen los datos obtenidos. Se calcula el cociente señal ruido a partir del valor del máximo de la intensidad y la desviación estándar en un área de 3x3 píxeles alrededor del objeto en cuestión. Para el caso de las espaciales se observa un mejor resultado aplicando el método de la división.

Por otra parte, los algoritmos basados en la desviación estándar temporal ofrecen mejores resultados que los basados en la desviación espacial en contra de lo que se podría pensar al observar las imágenes anteriores. Esto es posiblemente debido a la mala estimación de la varianza espacial ya que, para su cálculo es necesario tomar un

área suficientemente grande de la imagen en la cual se corre el riesgo de estar en zonas muy cambiantes del halo por la presencia de los anillos de Airy. Esto se discutirá en profundidad en la *sección 3.6.6*.

	Espacial				Temporal	
	Promedio		Stack		Promedio	
	Sustracción	División	Sustracción	División	Sustracción	División
Max	68.51	2.53	71.09	2.73	70.10	1.83
σ	26.82	0.98	27.40	1.04	24.74	0.67
SNR	2.55	2.58	2.59	2.63	2.83	2.75

Tabla 3.1: Cocientes señal ruido asociados a cada uno de los tipos de procesado simple. Valor máximo y desviación estándar asociados a una sección 3x3 píxeles.

3.6. Procesado de nivel II

Se trata ahora de mejorar los resultados obtenidos por medio de combinaciones de dichos resultados. De las imágenes calculadas a partir de la desviación estándar espacial se usarán para las siguientes combinaciones sólo aquellas calculadas a partir del stack por ofrecer los mejores resultados (*tabla 3.1*).

Dicho esto, se tienen cuatro imágenes con las que se calcular ahora seis imágenes más como producto de todas las combinaciones posibles a pares. De este modo se intenta resaltar en la imagen resultante de cada combinación sólo los objetos que estén resaltados en ambas imágenes combinadas. Es decir, los puntos donde las dos imágenes contengan objeto este saldrá potenciado del producto. Por el contrario, si en un punto con las mismas coordenadas las dos imágenes combinadas contienen ambas ruido o sólo una de ellas un posible objeto, el resultado será en cualquier caso la disminución del valor de la intensidad de tal punto. Se disminuye así la posibilidad de detectar falsos objetos.

Se espera, en principio, una mejora de los resultados con respecto a los algoritmos de nivel I para las seis posibles combinaciones de los mismos.

3.6.1. Producto espaciales

A continuación, en la *figura 3.19* se muestra la imagen resultado del producto de las dos imágenes resultantes de aplicar el método de sustracción y división de la desviación estándar espacial.

Se puede apreciar una notable mejoría con respecto a las imágenes obtenidas por los algoritmos de primer nivel, especialmente en referencia al ruido de fondo, lo que indica que el método de productos da buenos resultados a la hora de potenciar objetos.

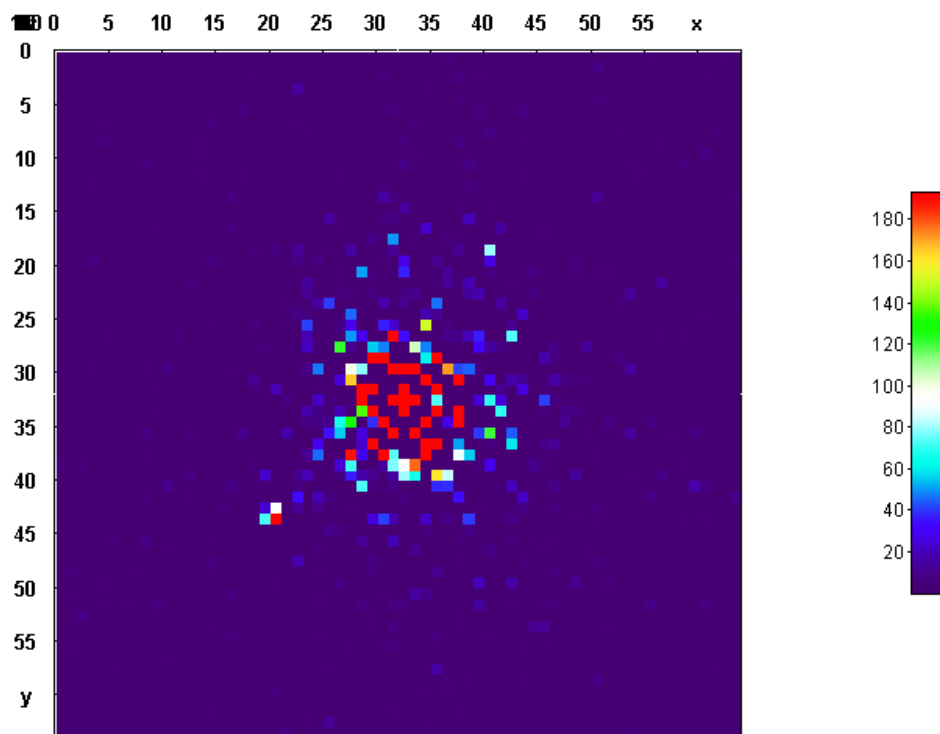


Figura 3.19: Producto de los resultados de los procesados de sustracción y división de la desviación estándar espacial.

3.6.2. Prodcuto temporales

Del mismo modo, se multiplican las imágenes obtenidas por el método de sustracción (*figura 3.17*) y división (*figura 3.18*) de la desviación estándar temporal. Se muestra el resultado de esta combinación en la *figura 3.20*.

En este caso se observa una reducción general del ruido de fondo y, en relación con

3.19, la pérdida prácticamente completa de los anillos de Airy (como ya pasaba con los algoritmos simples basados en la sustracción), dejando visibles únicamente ciertos fragmentos de los mismos. En cuanto al objeto, este algoritmo permite identificarlo correctamente.

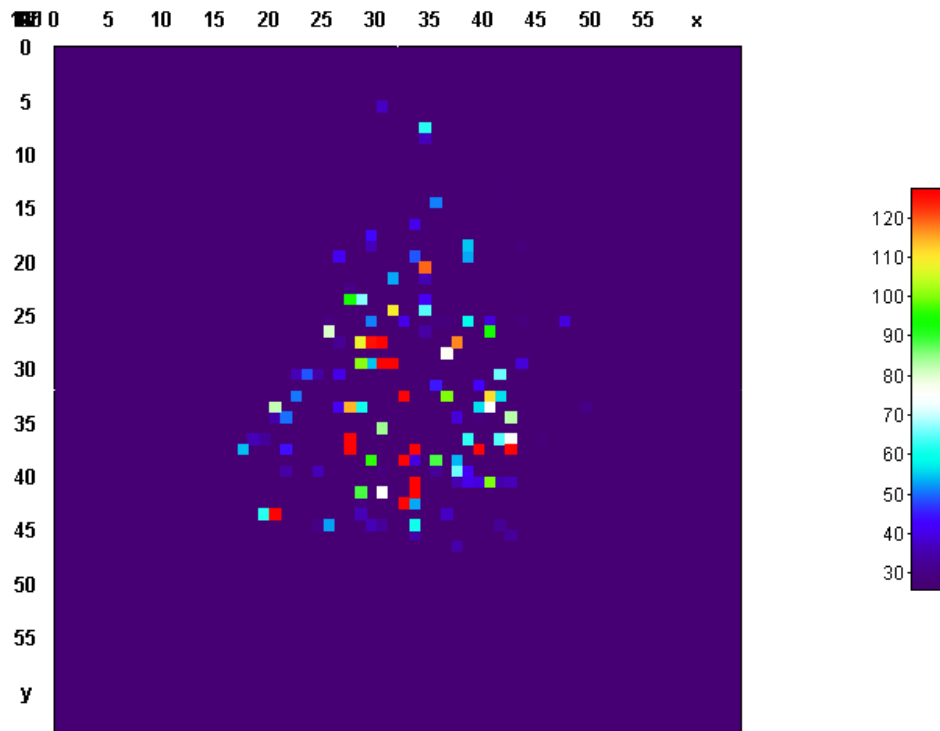


Figura 3.20: Producto de los resultados de los procesados de sustracción y división de la desviación estándar temporal.

3.6.3. Producto sustracciones

Continuando con el mismo procedimiento se muestra en la *figura 3.21* el resultado obtenido tras calcular el producto de la imagen obtenida por los métodos de sustracción: de la desviación estándar temporal y la espacial.

Se observa en este caso con mayor claridad el objeto dado que el ruido tiene en esta imagen una intensidad mucho menor a la del objeto. También, a diferencia del método anterior, se puede observar el segundo anillo de Airy así como pequeñas partes tanto del primero como del tercero.

En general, se observa con el este método del producto de los algoritmos de sustracción una gran disminución del ruido que no se había conseguido con los dos anteriores (3.19 y 3.20).

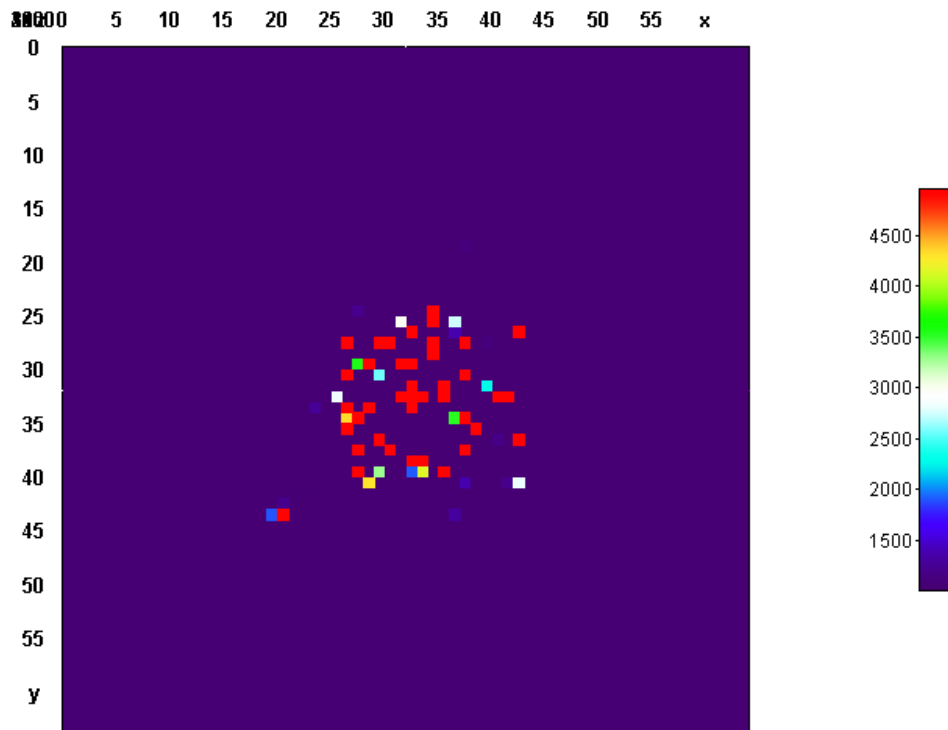


Figura 3.21: Producto de los resultados de los procesados de sustracción de la desviación estándar espacial y temporal.

3.6.4. Producto divisiones

Multiplicando las imágenes que resultaron de los procesados simples de división de la desviación estándar (espacial y temporal) se obtiene la imagen de la *figura 3.22*.

A simple vista, aparece la imagen más limpia, es decir, con la menor cantidad de ruido de fondo, entre todos los algoritmos que ya se han discutido. Sin embargo, tampoco aparecen los anillos de Airy ni siquiera una pequeña porción de los mismos como sí ocurre en los resultados de los otros procesados.

Sin embargo, aunque la imagen sea muy clara a simple vista, el procesamiento del producto de las dos procesados simples de división no da la mejor resolución del objeto como se puede observar en la *tabla 3.2* tras calcular el cociente señal ruido.

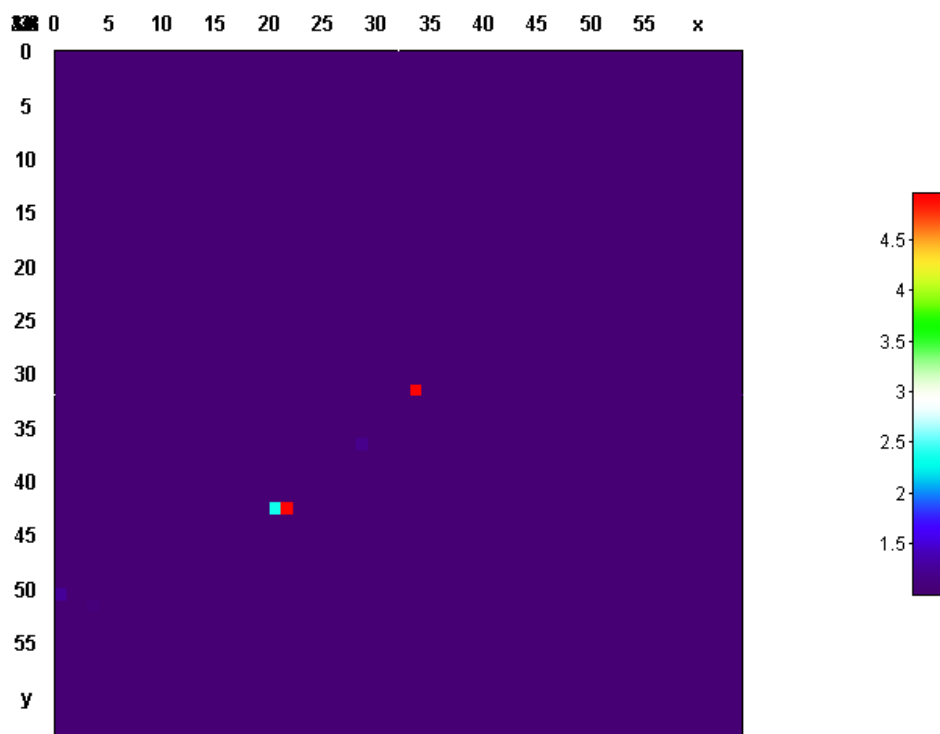


Figura 3.22: Producto de los resultados de los procesados de división de la desviación estándar espacial y temporal.

3.6.5. Productos cruzados

Como última parte de la sección de los procesados de nivel II se analizan los algoritmos consistentes en la multiplicación de las imágenes obtenidas con el método de división espacial (3.15) por el de sustracción temporal (3.17) y el de sustracción espacial (3.13) por el de división temporal (3.18). Se muestran respectivamente en la *figura 3.23* y *figura 3.24*).

En el primero de ellos se observa una buena limpieza del ruido de fondo resaltando adecuadamente el objeto. Sin embargo, al igual que ocurre con el procesamiento del producto de divisiones (*figura 3.22*), no aparecen los anillos de Airy por completo aunque, en este caso, sí se aprecian partes (muy pequeñas) del primer y segundo anillo.

Por otra parte en el procesamiento consistente en el producto de los procesados simples obtenidos por la sustracción de la desviación estándar espacial y la división de la temporal (*figura 3.24*) sí se puede observar gran parte del segundo anillo del patrón de Airy así como el objeto con un bajo ruido de fondo.

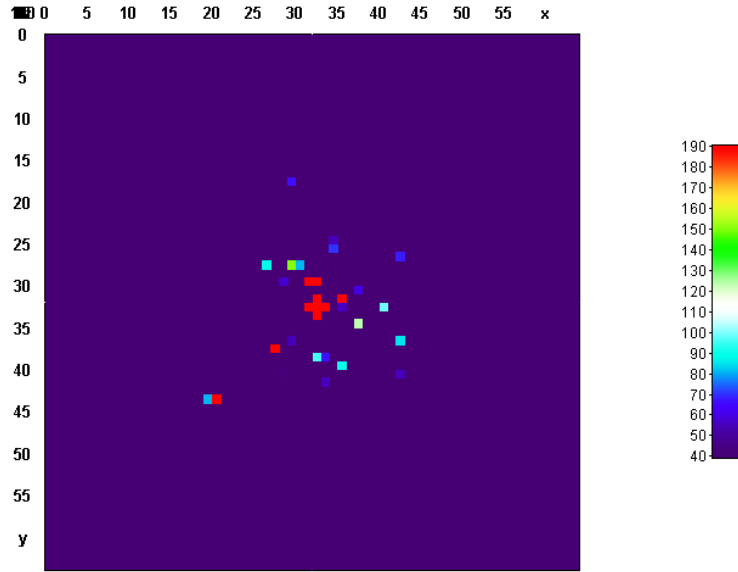


Figura 3.23: Producto de los resultados de los procesados de división espacial (3.15) y la sustracción temporal (3.17) .

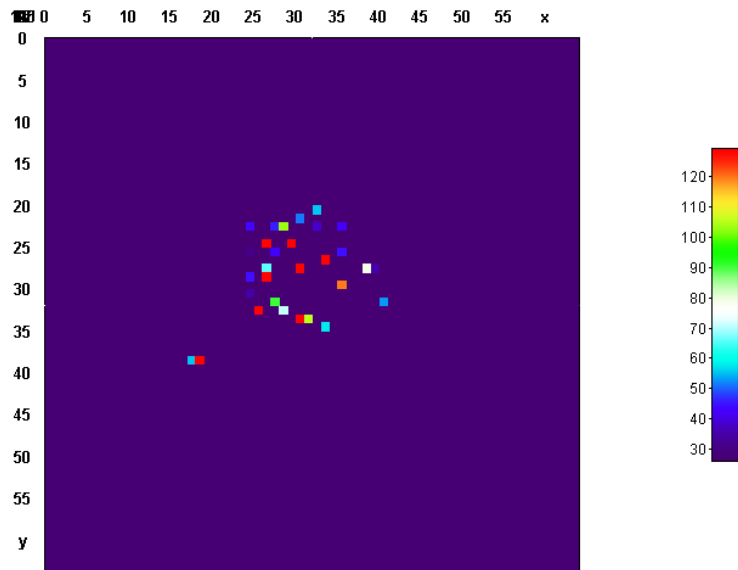


Figura 3.24: Producto de los resultados de los procesados de sustracción espacial (3.13) y la división temporal (3.18).

3.6.6. Cocientes señal ruido nivel II

Una vez expuestos los resultados de todos los algoritmos de segundo nivel y analizadas cualitativamente sendas imágenes resultantes de su aplicación se procede al

análisis cuantitativo discriminatorio de la eficacia de cada uno de ellos vía el coeficiente señal ruido, como se hizo anteriormente para los procesados de primer nivel (*tabla 3.1*).

Se muestran a continuación los cocientes señal ruido para los algoritmos consistentes en el producto de los algoritmos simples. Además, se calculan los valores también para objetos simulados de distintas intensidades con el fin de estudiar el comportamiento de los algoritmos en función de intensidad de los objetos que se pretenden detectar así como su eficacia en cada caso. El objeto de referencia se situó en el píxel (38,39), lugar que coincide aproximadamente entre el tercer y cuarto anillo de Airy donde se encuentra típicamente la zona de habitabilidad [2].

Escala		S(T)xD(T)	D(E)xS(T)	D(E)xD(T)	S(E)xD(E)	S(E)xS(T)	S(E)xD(T)
100	Max	727.03	1159.53	5.23	511.66	816.04	511.66
	STD	227.46	381.66	1.72	168.88	269.15	168.88
	SNR	3.20	3.04	3.04	3.03	3.03	3.03
200	Max	278.12	378.36	1.70	142.01	193.19	142.01
	STD	88.54	124.88	0.56	46.83	64.05	46.83
	SNR	3.14	3.03	3.03	3.03	3.02	3.03
500	Max	111.17	105.84	0.48	23.81	22.67	23.81
	STD	36.35	35.40	0.16	7.96	7.51	7.96
	SNR	3.06	2.99	2.98	2.99	3.02	2.99
750	Max	65.46	47.50	0.30	5.86	6.27	5.86
	STD	23.01	16.30	0.10	2.51	2.20	2.51
	SNR	2.84	2.91	2.89	2.34	2.86	2.34
1000*	Max	72.35	49.30	0.22	0.00*	0.00*	0.00*
	STD	27.33	17.10	0.08	13.12	25.61	13.12
	SNR	2.65	2.88	2.84	0.00*	0.00*	0.00*

Tabla 3.2: Cocientes señal ruido asociados a cada uno de los tipos de combinaciones de los resultados del procesado simple. Valor máximo y desviación estándar asociados a una sección 3x3 píxeles. **El procesado no resuelve el objeto.*

El cociente señal ruido viene calculado con el mismo procedimiento usado para calcular los valores del cociente señal ruido de la *tabla 3.1* para los algoritmos simples.

También se utiliza una sección de 3x3 píxeles de la imagen sobre la que se selecciona el valor del máximo y se calcula la desviación estándar.

Se puede comprobar en este caso una clara mejora de los resultados en comparación con los obtenidos para los métodos simples. Se observan especialmente buenos resultados para las combinaciones de la sustracción (S) por la división (D) temporales (T) ($S(T) \times D(T)$), las dos divisiones ($D(E) \times D(T)$) y la división espacial y la sustracción temporal ($D(E) \times S(T)$) puesto que son algoritmos capaces de clarificar objetos con un brillo 1000 veces menor que el de la estrella.

En cualquier caso, se consiguen mejores resultados para el objeto original (respecto al cual se tomaron las medidas de los procesados simples) en el caso de estos procesados complejos basados en la combinación de los simples que los obtenidos con estos últimos.

A continuación, en la *figura 3.25* se observa claramente la pérdida de efectividad de cada uno de los algoritmos combinatorios en función de la escala del objeto que se intenta descubrir sobre el halo:

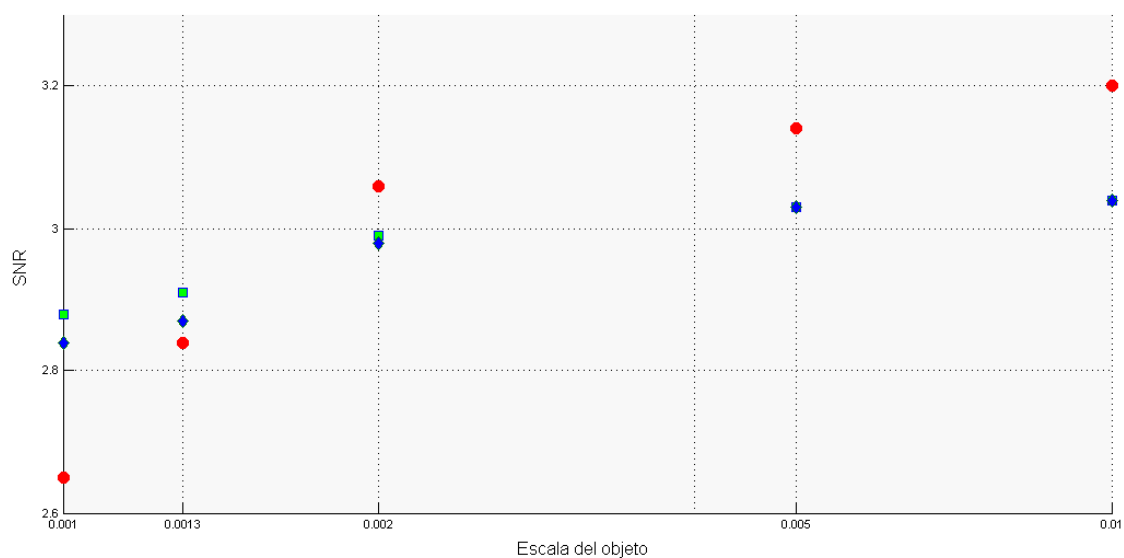


Figura 3.25: Relación entre el cociente señal ruido máximo del objeto conseguido por cada algoritmo en función de la escala de tal objeto. $S(T) \times D(T)$ Rojo, $D(E) \times S(T)$ Verde y $D(E) \times D(T)$ Azul.

Se puede observar que algunos de los algoritmos pierden efectividad conforme el objeto se vuelve más débil más rápido que otros. Especialmente llamativo el caso del procesamiento de la combinación de la sustracción y división temporales el cual es capaz de resolver un objeto 100 veces menos brillante que la estrella.

Estos resultados, en principio, podrían resultar extraños ya que se espera que los algoritmos basados en las desviaciones espaciales consigan mejores resultados pues, como ya se ha comentado anteriormente, en estos casos, es posible modificar cada imagen del stack con su propia variación. Con las temporales, sin embargo, solo existe la posibilidad de trabajar con el promedio ofreciendo, en principio, peor capacidad de corrección. Sin embargo, existe un motivo por el cual los algoritmos basados en promedios temporales pueden funcionar mejor, especialmente sus combinaciones:

Al estimar la varianza espacial en una determinada área (3x3 píxeles en todos los procedimientos anteriores) se corre el riesgo de tomar, y de hecho se toman, valores de la intensidad en píxeles correspondientes a anillos de Airy (separados en torno 1.5-2 píxeles). Esta situación implica una gran variación del halo en el interior del área usada para calcular la varianza del halo, falseando de este modo la medida y produciendo así un efecto contraproducente a la hora de intentar corregir el halo.

Este efecto, por el contrario, no está presente en la varianza temporal ya que siempre se calcula sobre el mismo punto (espacial), luego no existen fluctuaciones debidas a variaciones abruptas del halo. Por lo tanto, esta ventaja en la estimación de la varianza temporal es posiblemente lo que compensa la pobre estimación de su cálculo mediante el promedio hasta tal punto de otorgar mejores resultados que los procesados con el stack de desviación espacial. Este fenómeno se observa tanto para los resultados de los procesados simples (*tabla 3.1*) como para sus combinaciones (*tabla 3.2*).

Capítulo 4

Conclusiones

Se han presentado en este trabajo varios algoritmos posteriores a la técnica de *lucky imaging* con el objetivo de mejorar los resultados de este método de clarificación de imágenes astronómicas obtenidas por telescopios terrestres. Con la ayuda de estos algoritmos resulta ahora posible ir más allá del procesamiento habitual del simple promedio de las imágenes obteniendo, efectivamente, mejores resultados.

Resulta especialmente interesante resaltar en este punto la localización de los objetos de prueba usados para comprobar la eficiencia de cada uno de los algoritmos combinatorios. Estos objetos se situaron entre el tercer y cuarto de anillo de Airy ya que estos se encuentran en torno a la zona de habitabilidad del sistema. Es decir, los algoritmos que se han desarrollado en este trabajo para clarificar imágenes astronómicas resultan especialmente útiles a la hora de intentar buscar y detectar planetas dentro de la zona de habitabilidad de la estrella. Es por este motivo que, a partir de los resultados obtenidos que se han detallado a lo largo del *capítulo 3* y analizando los procedimientos y las resultados que se pueden extraer de cada uno de los algoritmos desarrollados, valorando siempre cómo de satisfactorios son en cada caso, es posible extraer también ciertas conclusiones generales que pueden ayudar al avance en el campo de detección de exoplanetas incluyendo, por supuesto, aquellos que se encuentran en la zona de habitabilidad.

A la vista de los desarrollos seguidos para llegar a los resultados presentados en este trabajo lo primero que se puede destacar de estos procedimientos, basados en la estadística de speckle, es su sencillez. Con procesamientos muy simples como se ha podido comprobar a lo largo de este estudio es posible obtener resultados muy buenos

a la hora de detectar objetos dentro de un sistema planetario (al menos en sistemas unietales como el caso del estudiado K21), pudiendo estos ser muy débiles en comparación con la estrella en el caso de ciertos algoritmos como se ha podido comprobar y como se discutirá a continuación.

La primera conclusión que se puede obtener de este estudio, de forma general, es que, aunque simplemente aplicando algoritmo más básico consistente en el centrado y promediado de las mejores imágenes (habitual técnica de *lucky imaging*) (Figura 3.12) se obtienen buenos resultados, es posible afinar más el procesamiento aprovechando la estadística de speckle obteniendo resultados mejores. De hecho, como se ha podido comprobar, con tan sólo aplicar procesos basados en operaciones simples, es decir, resta y división de la desviación estándar, los resultados obtenidos son muy satisfactorios superando en todos los casos el cociente señal ruido obtenido por el método básico de *Lucky Imaging*. Se comprueba así como la hipótesis sobre la que se sustenta este trabajo, basada en propiedad de la estadística de *speckle* (sección 1.3), en especial la Ec.(1.15). Cuando los algoritmos se sustentan sobre esa base teórica permiten obtener muy buenos resultados en el procesamiento de imágenes astronómicas siendo capaces de resolver objetos 750 veces menos brillantes que la estrella y, algunos de ellos, objetos hasta 1000 veces menos brillantes.

Estos buenos resultados son especialmente satisfactorios en el caso de los procesos de nivel I basados en la división de la desviación estándar temporal y en todos los procesos de nivel II. Es importante destacar que, aunque los algoritmos fundamentados sobre la desviación estándar temporal permiten obtener mejores resultados que los basados en la desviación espacial (por motivos ya discutidos en detalle al final de la sección 3.6.6), esta mejor calidad de las imágenes sólo se refleja en el valor numérico del cociente señal ruido mientras que, a simple vista, observando las imágenes el objeto es más distinguible en el caso de los procesos espaciales. Por lo tanto, resulta interesante aplicar todos los procesos empezando por los basados en la desviación espacial pues permiten obtener una idea, al menos visual, de dónde están colocados los potenciales objetos. Una vez hecho el análisis visual y localizado el objeto, se puede continuar aplicando sobre la misma imagen el resto de algoritmos de mayor precisión para comprobar que, en efecto, existe un objeto en esa posición.

Se comprueba por tanto, la efectividad y sencillez de los algoritmos desarrollados con base en el método de *lucky imaging* para la detección de exoplanetas. De esta

forma y tal al como está planteado, al no haber encontrado un límite de resolución con estos algoritmos, existe la posibilidad de seguir añadiendo más variaciones a cada uno de los algoritmos y/o combinaciones más exóticas de los mismos para mejorar cada vez más los métodos de procesado y obtener imágenes más claras.

Referencias

- [1]. Harrie G. J. Rutten, Martin A. M. van Venrooij. *Telescope Optics: Evaluation and Design*. Willmann-Bell, 1988 pp.207-208.
- [2]. Nicholas Michael Law. *Lucky Imaging: Diffraction-Limited Astronomy From the Ground in the Visible*. Institute of Astronomy and Selwyn College Cambridge University, 2006, sec. 1.3.
- [3]. Robert J. Noll. *Zernike Polynomials and Atmospheric Turbulence*. 1975.
- [4]. Manuel P. Cagigal, Pedro J. Valle, Carlos Colodro-Conde, Isidro Villó-Pérez and Antonio Pérez-Garrido. *Covariance of lucky images for increasing objects contrast: diffraction-limited images in ground-based telescopes*. 2015, sec. 2.
- [5]. Manuel P. Cagigal, Pedro J. Valle, Miguel A. Cagigas, Isidro Villó-Pérez, Carlos Colodro-Conde, C. Ginski, M. Mugrauer and M. Seeliger. *Covariance of lucky images: performance analysis*, 2016, sec.1
- [6]. Joseph W. Goodman. *Statistical Optics*. Wiley Classics Library, 2000, pp.121-124.